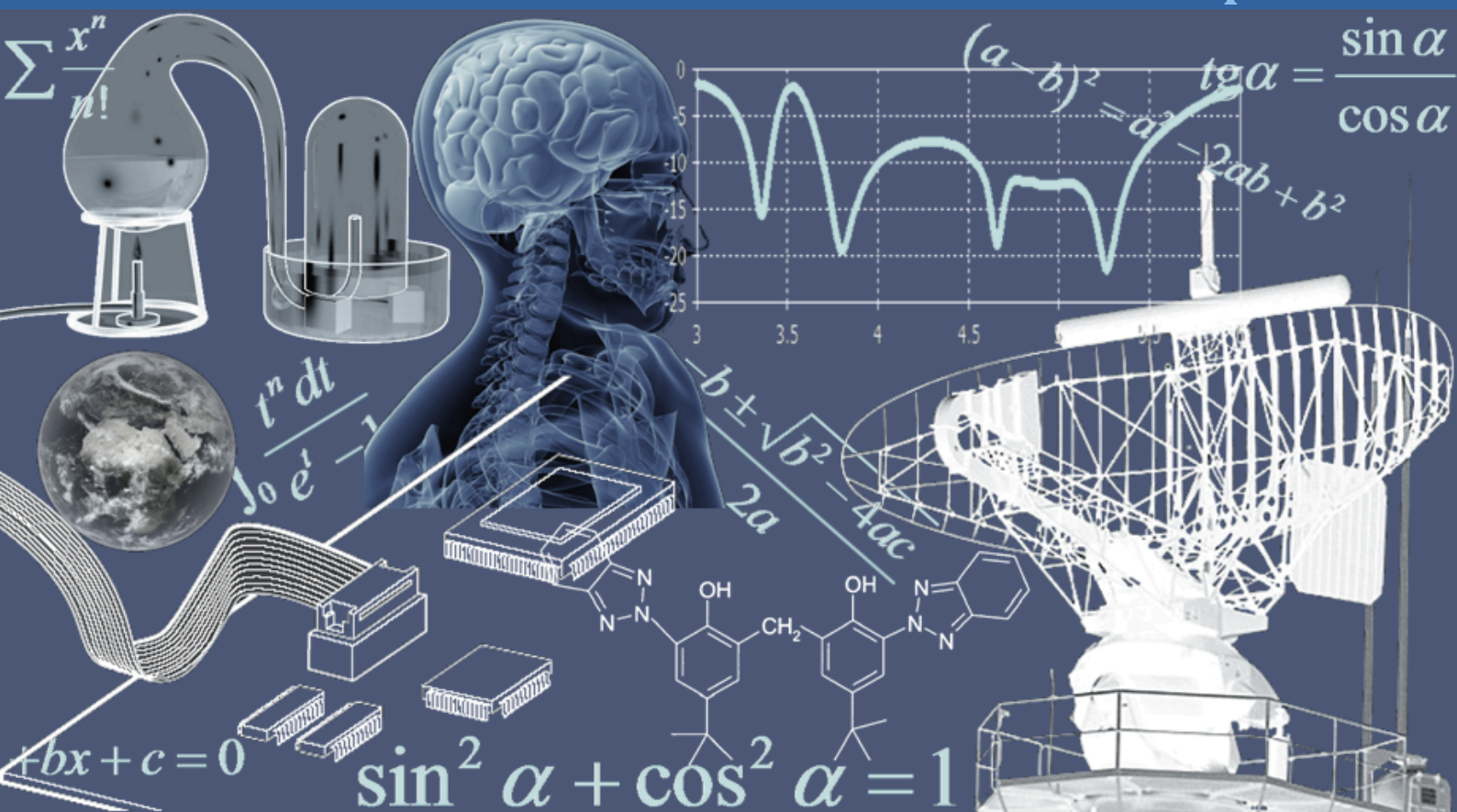


INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATION AND APPLIED STUDIES

Vol. 45 N. 2 April 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

Relevance of Common Casting Defects in Restorative Clinical Practice <i>Yusra Fatima, Daniya Naved, and Akash Raj Sharma</i>	301-306
Modèle M'BUTI: Approche innovante de gestion de projet en RDC avec intégration de l'écriture Mandombe et réduction de la dépendance aux modèles scientifiques importés <i>Lukau Matezo Espoir and Simon Malueki Matuasilu</i>	307-320
Advancing while identifying constructive lines from West African pearl millet accessions for future hybrid breeding <i>Issaka Ahmadou, Maïnassara Habibou, Idrissa Tahirou Hassane, Datoloum Narcisse, Boubacar Adamou Djamil, Issa Hamidou Zakari, and Maman Issa Yahaha</i>	321-338
Estimation of the elastic characteristics of mortars reinforced with short Borassus aethiopum mart fibers <i>Abelim Passoli, Tiambo Abbas Datchossa, Emmanuel Olodo, and Douli Lare</i>	339-344
Le commerce informel à Bouaké face au défi de la ville intelligente et durable <i>Koffi Guy Amoatta, Péré Julien Lamah, Julien Yao Koffi, and Alain François Loukou</i>	345-356
Potentiel du basilic, du sorgho et du maïs comme plantes de service dans la gestion des insectes défoliateurs du Moringa au Niger <i>Akonde Zinsou François-Xavier, Ousmane Zakari Moussa, and Iro Dan Guimbo</i>	357-370
Emergence, approaches and challenges of sustainable forest management in Central Africa <i>Maurice Mbuangi Lusudi</i>	371-379
Contribution to studies on the impact of marine pollution on groundwater quality in the islands <i>Mamadouba Sylla, Moussa Diallo, Keita Kandas, and Alpha Oumar Bah</i>	380-390
Étude préliminaire sur la diversité des plantes herbacées introduites et naturalisées de Côte d'Ivoire <i>GOULI GNANAZAN Zinsi Roseline, Yao N'Guessan, Nanan Kouassi Kouman Noël, and N'Guessan Anny Estelle</i>	391-400
L'investissement direct étranger en Amérique du nord <i>Ngoy Kabila Elisée, Kazembe Ngulula Sebastien, Mbunso Bindu Etienne, and Muteba A. Yumba Eustache</i>	401-406
Caractéristiques géologiques des formations de la vallée de Lombe du Territoire de Tshela (Province du Kongo Central, RD Congo) <i>Nebys Mupepe Ngayipa, Patrick Mukonkole Mukonkole, Henock Tshombe Mbaya, and Wally Kimbangi Nkanu</i>	407-414
Approche d'adressage et de cartographie des accidents de la circulation en l'absence d'un system formel de dénomination des rues: Cas de la commune de Yopougon (Abidjan, Côte d'Ivoire) <i>Aubin Kouassi YAO-NANAN, Christian Gnagui ADON, Patrice N'Guessan AKOGUHL, Justin Kouadio KONAN, and Fernand Koffi KOUAME</i>	415-430
Agronomic performances of plantain (Musa paradisiaca, AAB, Corne 1) vivo-plants produced on a substrate treated with NaCl solutions and Sargassum natans extracts <i>Brahima Djaratche, Seu Jonathan GOGBEU, Koffi Jean Baptiste Djiwonou, and AYOLIE Koutoua</i>	431-438
MFCC number limit for automatic sound recognition: Application to the chainsaw sound identification <i>N'Tcho Assoukpou Jean GNAMELE, Bi Tra Jean Claude YOUAN, and Konan Fernand GBAMELE</i>	439-447
Structure du peuplement des espèces de bois d'œuvre menacées du massif forestier de Yapo-Abbe (Côte d'Ivoire) <i>Sié Fernand Pacôme OUATTARA, Aboubacar Ouattara, Franck Placide Junior PAGNY, and Kouassi KOUADIO</i>	448-457

Relevance of Common Casting Defects in Restorative Clinical Practice

Yusra Fatima¹, Daniya Naved¹, and Akash Raj Sharma²

¹Department of Prosthodontics, Subharti Dental College and Hospital, Swami Vivekanand Subharti University, Meerut, India

²Department of Prosthodontics and Crown and Bridge, Subharti Dental College and Hospital, Swami Vivekanand Subharti University, Meerut, Uttar Pradesh, India

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: Indirect or cast restorations are fabricated in the dental laboratory by technical staff while the restorations are placed by clinicians. Clinicians generally do hold theoretical knowledge of the casting process and casting defects but lack experience of fabrication. This hampers them from having an understanding of a particular casting defect. This article reviews the recent evidence in casting defects and implies their application in clinical practice. The aims and objectives of such a review are to allow clinicians to be in a better position to identify these defects of casting and accordingly take action. The article also presents a brief appraisal of the materials involved and their potential behaviour in causing such defects. The casting technique and the properties of the material that interact during the fabrication of indirect restorations have also been discussed.

KEYWORDS: Casting technique, investment materials, base metal alloys, noble alloys, fixed partial denture.

1 INTRODUCTION

Restorative and prosthetic dentistry, in particular, makes extensive use of cast or indirect restorations. They are created in the dental laboratory using a time-honoured casting process that follows the same principles as the 'lost wax' technique, which is commonly used in casting a wide variety of household and industrial objects.¹ Properly fitting dental casting is a primary goal of the casting and investment process. The likelihood of marginal leakages and secondary caries caused by the dissolution of commonly used cements increases in proportion to the breadth of the exposed cement line and the degree to which the restoration does not fit precisely.² Obtaining accurate casting is predicted to compensate for the thermal shrinkage of the noble and/or base metal alloys, which occurs as it cools in the investment mould. A shrinkage value of 1.4% ($\pm 0.2\%$) is considered a logical value for modern dental casting gold alloys, while it is more for base metal (2.25%) or non-precious dental alloys.³ During the buildup of the wax pattern, the size of the pattern is made as such so that after it is converted into metal, which will undergo shrinkage upon cooling, it should be the exact replica of the desired prosthesis. This shrinkage of dental alloys during casting is achieved by different technical procedures that require accurate settings and control. These methods include expanding the wax pattern by thermal means, expanding the investing material during setting, investing underwater to hygroscopically expand the investment, and finally expanding the investment by using thermal means.⁴ Another important objective is the production of dense casting with a smooth surface, as these enhance the strength of the casting and do not affect the overlying colour and translucency of bonded ceramics.⁵ Internal porosity results in voids, which weaken the casting. Higher failure rates of more than 69% are as a result of mechanical failures, which in turn are dependent upon the features of the tooth preparation and degree of luting.⁶ External porosity allows tarnish and corrosion to occur, posing serious difficulties for plaque removal. Biofilm deposition on restorative materials can deteriorate the material and roughen its surface, leading to bacterial infiltration at the interface between tooth structure and restorative material, resulting in secondary caries and impacting pulp pathology.⁷ To obtain a high-quality casting requires a thorough knowledge of the composition elements of casting alloys and their handling characteristics and meticulous attention to the technical details of the investing and casting process, irrespective of machine being operated digitally or using artificial intelligence.⁸ The importance of solidification of the metal in the molten alloy in the mould also cannot be neglected. As the casting solidifies, it first occurs in the thinner areas; it contracts, but at the same time, molten metal is continuously being fed through the sprue opening from the still molten button.⁹ This ensures dense casting while eliminating the chances of inadequate casting or incorporation of porosity. The sprue solidifies, followed by the button. In this manner, any porosity will be located in the sprue and button

and not in the casting.^{1,3,9} Although it is true that perfect casting has never been made, dental casting procedures have progressed to an extent at which failure has become a rare exception, usually not traced following the basic principles associated with sound techniques.

Most clinicians do not hold expertise in the casting process since all castings are performed by dental technicians in the production laboratories. However, the clinicians have to decide whether the defect in the casting should be accepted or rejected, for which it is mandatory for him to reason out what will be the effects on the treatment if the defective casting is placed in the patient's mouth. Finance and time factors often influence such decisions. Chairside adjustment can be difficult and exhausting for both the patient and clinician, and it has been identified as a prevalent source of clinician irritation, resulting in the consumption of important clinical time and jeopardising patient trust.¹⁰ In recent times, there have been some significant advancements in industrial casting processes due to digitisation of investing and casting machines.¹¹ A lot of focus has been on the factors that are often subjectively controlled, like expansion of the mould, with promising results.

This literature analysis aimed to thoroughly assess the trends in casting of dental restorations in recent years. The primary aim being to enhance knowledge based on new research findings, enabling clinicians to apply in practice. Different medical electronic databases [Medline, Proquest, Pubmed, Scopus, Google Scholar] were searched for material spanning from 2010 to 2024. Search terms of significance comprised: clinical study, cross-sectional, randomised, placebo-controlled, qualitative or quantitative, empirical, survey, fixed partial denture, dental casting procedures, casting investments, casting alloys, and failures related to FPD. To identify pertinent studies, two independent reviewers used a piloted review form to examine the titles, abstracts, keywords, references, and full texts.

2 SPRUING OF PATTERNS

Sprue may be made of plastic, wax, or metal. A sprue is attached to the wax pattern at the other end of the crucible, into which a casting ring can be inserted. Sprue former should be at least 14 gauge (1.7mm) in diameter unless the pattern is extremely small, and sprue former up to 10 gauge (2.5mm) may be used for very large patterns such as bulky crowns.^{3,5,12} Long, thin sprue formers are likely to cause internal porosity, commonly shrinkage porosity; the metal will freeze in the sprue before it freezes in the inlay or crown. Should a reservoir be used, it must have a greater bulk than the corresponding section of the design into which the sprue former is placed. The sprue former's length should be changed to let the pattern run roughly 3–6 mm from the ring's open end. If a greater thickness of investment is present, backpressure porosity may result. When investment is bulky, air cannot escape through the investment and the metal is prevented from completely filling the mould. A digitally designed casting sprue system was investigated and found to be more effective in distributing molten alloy to the casting while undergoing the solidification process.^{5,13} Greater thickness of investment can lead to changes in back pressure porosity. Bulky air cannot escape through the investment; hence, the metal cannot fully occupy the mould. Ideally, the influence of poor sprue designs leads to major defects in the castings, which face rejection by the dental technicians. Therefore, these castings may not reach the dental practitioner, where he has to face the consequences or make a clinical decision. However, it has a significant impact on the accuracy of castings for major implant restorations involving multiple implants (fully bone-anchored or multiple implant overdentures).¹⁴ Porosity when observed in the pontic can be accommodated clinically by application of a resin; however, such defects have an influence on the accuracy of the margins of adjacent retainers.¹⁵ By adding chill vents that speed the cooling of the pontic relative to the components of the cast external to the dental unit itself, porosity can be reduced when a dental casting comprises both thick and thin pieces.^{15,16} Later on, these cast extensions are taken off. Throughout the investing process, cleanliness is really important. Before making an investment, the wax design should be clean of any oil film or trash. One can lower the wax pattern's surface tension by running a debubbler. This helps the pattern surface to moisten better. Some wax patterns are so tickled that it becomes extremely difficult to obtain a dense, non-porous casting. In such cases, a chill set may be used. It is generally a sprue former wax (18 gauge), which is attached to the wax pattern directly opposite to the larger sprue former and which terminates within the investment but close to its periphery.

It is said that molten metal going to mould goes directly to chill set, which begins to solidify first because it is small and towards the external surface of the mould.¹⁷ This then induces solidification in the main body of the casting and causes it to freeze before the sprue. A very short sprue can produce porosity in the area of casting to which the sprue is attached since the button, which should solidify last and therefore not be dense, is too close to the casting.^{5,18} The sprue length should be adjusted so that the top of the wax pattern is within 6.5mm (1/4") of the open end of the ring for gypsum-bonded investments.^{2,8,12} With phosphate-bonded investments, it may be possible to position within 3.25 (1/8") of the top of the investment.^{5,13,17} For reproducibility of casting accuracy, the pattern should be placed as close to the centre of the ring as possible.^{8,12} A short sprue former can also place the mould sprue in the investment so far from the end of the casting ring that gases that remain from the wax burnout cannot escape easily through the investment.¹⁹ This may result in back pressure porosity. For this reason, the sprue former must be located about 6 mm from the open end of the ring.^{8,17} With a very long sprue, it is more likely that the first pattern to solidify will be the sprue with resulting shrinkage porosity in the casting. A reservoir can be used when the length of the sprue former is such that it places the button too far from the casting.^{8,12} The sprue former should be as straight as possible in order to lessen the change of excessive turbulence as the alloy enters the mold.⁹ Such turbulence increases porosity. The use of two sprue formers may be advantageous for wax patterns that possess two bulky areas separated by a thinner area.^{8,12} A single sprue former attached to only one of the bulky areas increases the potential for shrinkage porosity.^{12,20} Since early solidification of the thin areas prevent further supply of molten alloy to the other bulky area. The attachment of the sprue former to wax

pattern should be such that the transition in form from sprue former to pattern is smooth and does not possess pits or irregularities into which investment can flow investment that can be broken off and carried into the mould by the molten alloy, thus producing defects in the casting.^{8,17,20} Irregularities in the sprue may also cause turbulence in the flow of the molten alloy entering the mold. When multiple units are being cast, the use of a transverse or runner bar is advocated.^{8,17} The alloy enters the mould through the larger sprue former of the (8 gauge) in the horizontally positioned transverse bar (10 gauge) and finally into the sprue formers to individual units after (12 gauge).¹⁷

3 INVESTING MOLD

The crucible former forms the conical depression in the end of the investment mould that guides the molten alloy into the chance (left by the sprue former and on its void in which the wax pattern is located).^{4,13} It may be made of rubber, metal, or plastic.^{12,19} This should be free of any investment or foreign material prior to attachment of the sprue.¹³ It is advantageous to coat the surface with a thin layer of petroleum jelly to prevent adherence of the investment.¹⁷ This allows the molten alloy to pick up small particles of investment, thereby producing inclusions or voids in the casting.^{8,21} The casting ring must be lined with a sheet of asbestos or ceramic paper to permit greater freedom of expansion.^{8,9,12,15} If ring liner is not used, there is restriction of the expansion of the mould space, resulting in smaller casting.¹⁵ There should be no overlap of liners. Liners always must be stabilised with sticky wax.^{8,15} A liner that is 3 mm short of the open end of the ring promotes more equal expansion of the casting in the axial and horizontal directions. In the wet liner technique, the water absorbed may also assist in semihygroscopic expansion in addition to normal setting expansion. Two thicknesses encourage more setting expansion than obtained from one liner.^{12,15} Ceramic liners have now replaced asbestos considering the health hazard.¹³ These liners absorb less water and may result in significant incidence of fins in the castings.²² The manufacturer's direction for any given investment should be followed carefully. A variation of 1 ml of water can significantly alter the setting expansion and also the manipulation of the investment and character of the casting surface, especially in gypsum-bonded investments.^{13,15} Although increasing the water powder ratio makes investing easier, the investment will lose strength. The reduced strength may cause cracks to occur during heating, and the surface of the casting will be inferior. Therefore, water should be accurately measured in a graduated measuring cylinder and the powder weighed. The powder and water must be mixed properly to wet all particles. Mixing under vacuum is performed. The investment material must be initially painted over the wax pattern to avoid entrapping of the air.^{8,22} After the casting has been filled with investment material, any excess should be removed before the material sets. The filled ring is set aside for investment material to complete its setting reaction and expansion, then placed in a burnout oven or water bath at 100 degree fahrenheit (F).^{12,23} For phosphate-bonded investments, the mould cavity is increased by increasing the number of asbestos layers, using fibrous ceramic lining, increasing the special liquid ratio, decreasing the total liquid water content, hygroscopic expansion, and burning out at higher temperatures. No residual gypsum must be present, which may accelerate the set and will break down at 1300 degrees F, liberating sulphur gases that can be deterrent to casting.^{13,22} Because the mixing process releases ammonia gas, it's crucial to place the combined investment in a hoover immediately afterward to release part of the gas and lessen the likelihood of bubbles sticking to the wax design.²⁴ Thus, bubbles may cause little spheres on the coping surface, which have to be ground. The invested pattern should rest for at least 45 minutes before burnout procedures commence. If the invested pattern cannot be burnt out within 1 hour or two, the ring should be stored in a humidor at 100% humidity.²⁵ To prevent excessive drying during burnout, invest the pattern in a humidor after several hours, as molten wax from the burnout process may be absorbed into the dry investment. To clean cast a ring, place it on a raised object and heat it without allowing it to cool. Place the mould in a preheated furnace at 480 degree centigrade (C) for 20 minutes, then raise to 700 degrees C for 30 minutes.^{9,12,13} Avoid heating gypsum or silica investments to avoid breaking them. Gypsum-bonded investments should be heated to 468 degrees C for hygroscopic or 650 degrees C for thermal expansion, and 700 degrees C to 870 degrees C for phosphate-bonded investments.^{8,12,15,22} Burnout should be done wet to prevent wax adhesion and flush wax out. High-heat technique converts carbon into gases.^{8,9}

The hygroscopic low heat technique compensates for expansion through water bath expansion, warm water entering the investment mould, and causing thermal expansion. The mould can be placed in a preheated furnace for 7 hours without disintegration. To increase expansion, increase the water bath temperature to 40 degrees C, use two layers of liner, and increase the burnout temperature range.²² The high heat technique for gypsum investments involves heating the mould to 650–700 degrees C in 60 minutes and holding it for 15–30 minutes to prevent cracking and separation.^{12,17} Casting must be made immediately to prevent contamination and brittleness.²⁶ High heat technique for phosphate investments involves expanding the wax pattern, setting it higher than gypsum investments due to special liquids, and achieving greater thermal expansion at higher temperatures. Burnout temperatures range from 750 degrees C to 900 degrees C, with heating rates slow to 315 degrees C and rapid to complete after 30 minutes.^{12,15}

Casting should be done immediately, with a time allowable of 1 minute without noticeable change in dimension. Alloy can be melted using torch flame, electrical resistance, or air pressure and then cast into the mold. The centrifugal casting machine uses a broken arm to melt metal in a crucible, increasing its rotational speed.^{12,24} The heated casting ring is released, and the metal fills the mould, causing a hydrostatic pressure gradient of 30-40 pound per square inch (psi) at the tip, promoting heat transfer and solidification. The electrical resistance heated casting machine uses an automatic melting process in a graphite crucible, preventing oxidation and ensuring complete solidification from the casting ring's tip to the bottom surface.¹⁵ The induction casting machine melts metal using an induction field in a crucible, then forces it into a mould using air pressure or vacuum.¹⁷

4 CASTING DEFECTS

One of the most major issues one has while developing and eliminating the design from the mouth or die is distortion. It follows from stress release and temperature changes. The tensions come from contraction on cooling, moulding, carving, removal, time, and temperature during storage.¹³ Like other thermoplastics, waxes prefer to revert to their natural form following manipulation. Elastic memory is what we call it here. Thus, the pattern has to be invested right after being taken out of the preparation. As the metal cools around the wax pattern, some distortion of it results. The setting and hygroscopic expansions of the investment could cause the pattern's walls to move unevenly. The smaller the distortion, the smaller the setting expansion is. Also change the pattern's thickness to lower distortion. Although it's not a major issue, distortion explains some of the inexplicable errors in small castings.²² While on the inside surface may preclude correct seating of an otherwise accurate casting, excessive roughness or imperfections on the outside surface call for extra finishing and polishing. Still, the technique's roughness on the casting is rather more than that of wax pattern. This variation corresponds with the investment's particle size and its capacity to replicate the wax pattern with microscopic accuracy. On the casting, air bubbles show up as tiny nodules that adhere either during or after the investing operation. Vacuum investing is the greatest way to prevent air bubbles. Care should be taken even using a manual approach to prevent including air bubbles into the investment. Regular use of a mechanical mixer and vibration before and after mixing should be followed. Preventing the gathering of air bubbles on the surface of the pattern could be achieved with the use of a wetting agent. The wetting agent should also be air dried since any extra may dilute the investment and maybe cause surface flaws on the casting. This type of surface irregularity can show up over the surface as minute ridges. Wax has no binding power over investments. A water layer may develop irregularly over the surface whenever investment material is not in close proximity to wax. A wetting agent could help to prevent such an irregularity; too high a water-to-powder ratio may also have this impact.²⁴

A flaking of the investment as the water or steam flows into the mould clearly results in fins or spines on the casting or a particular surface roughness. Too rapid heating causes this. Moreover, such a surge of steam or water could contain some of the salts utilised as modifiers into the mould, left as deposits on the walls following the water evaporation. The investment-filled ring from room temperature to 700 degrees C must be heated very slowly; at least sixty minutes should elapse during this process. One should heat it more slowly the larger the bulk is.^{12,22}

If the heating duration is too short or if the furnace lacks enough air, incomplete removal of wax residues results. The casting from the gases generated when the heated alloy comes into contact with carbonaceous residue may show voids or porosity. Sometimes the casting is carried with a tenacious carbon covering that pickling almost cannot remove.⁸ The W: P ratio affects the roughness of casting, with higher ratios resulting in rougher investment. Accurate water measurement is crucial. Prolonged mould heating can cause disintegration and roughening, potentially contaminating the alloy. Thermal expansion techniques should be heated to 700 degrees C and cast immediately.^{14,17} Molten gold should be elliptic, yellow-orange, and spin. Use a 15-20-pound or 7-9-kg pressure or 4-turn centrifuged machine.¹² The surface texture of a casting is influenced by the binder-to-quartz ratio and coarse silica. Surface roughness is not a factor if the investment meets ADA specification no. 2.¹⁵ Sharp deficiencies indicate foreign particles, bright concavities, and sulphur contamination. A rough crucible with investment may cause roughness upon removal. Proper sprue casting involves avoiding surface roughness and glancing impacts on the investment surface. Pattern placement should be in different planes to prevent wax expansion and potential cracking. Improper torch adjustment can lead to carbon absorption, carbides, or visible carbon inclusions. Improper melting and reuse of metals can alter physical properties and reduce corrosion resistance. Contamination with copper during improper picking can cause future surface changes. Mercury contamination can cause discolouration and increased corrosion susceptibility in gold alloy restoration.

Location Shrinkage Porosity occurs when molten metal is not fully fed during solidification, causing a void in the last portion of the casting.²⁰ This void can occur at the sprue casting junction, between dendrites, or externally in the crown.²⁴ To eliminate this, flaring the sprue attachment point and reducing the mould melt differential can be done.¹² Microporosity is a defect in fine-grain alloy castings due to rapid solidification shrinkage, often seen in sectioned castings. Pin holes and gas inclusions are related to gas entrapment during solidification, with gas inclusions being larger than pin holes.¹³ Larger voids may be caused by gas trapped by the molten metal or carried in during the casting process. Castings contaminated with gases are black and difficult to clean. Larger spherical porosities can be minimised by premelting gold alloy on a charcoal block and correctly adjusting the blowpipe flame. Sub-surface porosity occurs when solid grains and gas bubbles nucleate at the moment of metal freezing at mould walls. It can be reduced by controlling the metal's entry rate.²⁵ Back pressure porosity occurs when air in the mould cannot escape through the investment's pores. Proper burnout, mould and casting temperature, and high casting pressure can help eliminate these issues. Incomplete casting can occur due to insufficient venting of the mould and the high viscosity of the fused metal. Adequate casting pressure, applied for at least 4 seconds, is necessary to overcome back pressure and fill the mould, as it takes only 1 second.^{12,22} Incomplete mould elimination can occur due to excess combustion products or wax or moisture particles. These castings are shiny and may be due to a strong reducing atmosphere. The alloy's viscosity and surface tension decrease with temperature, so raising it above its liquidus temperature prevents premature solidification.

5 CLINICAL APPLICATIONS

The implications of dental castings and their relative defects apply to all forms and designs of fixed partial denture treatments, which include customised posts and cores, single crowns, fixed partial denture designs, all implant prostheses, and removable partial dentures. In fixed partial denture treatments, the choice of restoration type and material is primarily determined by the existing natural tooth structure.²⁷ Alloy restorations in any form offer advantages such as excellent strength-to-volume ratios, high thermal conductivity, allowing for thin-sectioned restorations while maintaining rigidity and fracture resistance.²⁸ For post-core restorations using base metal alloys, the modulus of elasticity varies significantly between posts, with fibre posts having a higher value of 45.7–54.8 GPa, cast posts ranging from 178.34–198.76 GPa, and dentin posts having an average of 18.6 GPa.^{29,30} Cast posts with cores should not bind within the root canal, and fitting cast post-and-core restorations is crucial for good adaptation and passivity.³¹ Since cast posts are smaller in size for casting and aren't affected much by the changes in casting shrinkage, they mostly present a casting defect in the form of surface roughness, which usually binds to the prepared walls. Clinically, they are less visible with the naked eye; therefore, a clinician should use a magnifying glass to ensure that the surface is smooth. At times they also could be due to rough pattern, which is more common when using pattern resins for direct technique.³²

Another aspect of casting defects may not be reflected if they are due to treatment plans or prosthesis designs. Such cases are long-span fixed partial dentures or implant-supported prostheses, where due to the bulk of metal used for restorations, the casting shrinkage results in marginal discrepancies.^{33–35} Occlusal discrepancies are mostly due to incorrect occlusal records rather than defects in casting for either a crown or a partial denture.³⁶ Among other influential factors, the size and shape of the natural tooth or the abutment whose crown is fabricated should also be taken into account. Abnormal fusion of teeth results in multiple different surface anatomical features that may not be able to be replicated under ideal conditions.³⁷

6 CONCLUSION

Casting procedures involves thorough knowledge of each individual material that participates in the process, with each material contributing sufficiently either physically or chemically to have a confounding influence on the final outcome. One cannot conclude that one variable is more important or one is important than the other. All variables influence sufficiently to effect the casting process. A dental practitioner must be in a position to point out the reasons for a poor casting by the laboratory technician.

ACKNOWLEDGMENTS

None

CONFLICT OF INTEREST

None

REFERENCES

- [1] McCoy T. Lost wax casting technique for metal crown fabrication. *J Veterin Dent* 2014; 31 (2): 126-32.
- [2] Ahmadi E, Tabatabaei MH, Sadr SM, Atri F. Comparison of the marginal discrepancy of PFM crowns in the CAD/CAM and lost-wax fabrication techniques by triple scanning. *Dent Med Problems*. 2020; 57 (4): 417-22.
- [3] Fusayama T, Ogata K. Casting shrinkages of inlay golds of known composition. *J Prosthet Dent* 1966; 16 (6): 1135-43.
- [4] Soo S, Palmer R, Curtis RV. Measurement of the setting and thermal expansion of dental investments used for the superplastic forming of dental implant superstructures. *Dent Mater* 2001; 17 (3): 247-52.
- [5] Sayed ME, Lunkad H, Mattoo K, et al. Evaluation of the effects of digital manufacturing, preparation taper, cement type, and aging on the color stability of anterior provisional crowns using colorimetry. *Med Sci Monit Basic Res*. 2023; 29: e941919-1.
- [6] Sayed ME, Reddy NK, Reddy NR, et al. Evaluation of the milled and three-dimensional digital manufacturing, 10-degree and 20-degree preparation taper, groove and box auxiliary retentive features, and conventional and resin-based provisional cement type on the adhesive failure stress of 3 mm short provisional crowns. *Med Sci Monit*. 2024; 30: e943237-1.
- [7] Al Moaleem MM, Dorout IA, Elamin EFI, et al. Biofilm formation on dental materials in the presence of Khat: Review. *JSM Dent* 2017; 5 (2): 1087.
- [8] Dučić N, Manasijević S, Jovičić A, Čojbašić Ž, Radiša R. Casting process improvement by the application of artificial intelligence. *Appl Sci*. 2022; 12 (7): 3264.
- [9] Chan D, Guillory V, Blackman R, Chung KH. The effects of sprue design on the roughness and porosity of titanium castings. *J Prosthet Dent* 1997; 78 (4): 400-4.
- [10] Al-Makramani BM, Sayed ME, Al-Sanabani FA, et al. Comparative evaluation of dimensional and occlusal accuracy of non-working antagonist casts: a study on different impression materials and 3d printing. *Med Sci Monit*. 2023; 29: e941654-1.

- [11] Konieczny B, Szczesio-Wlodarczyk A, Andrearczyk A, et al. Enhancing the mechanical properties of co-cr dental alloys fabricated by laser powder bed fusion: evaluation of quenching and annealing as heat treatment methods. *Materials*. 2024; 17 (21): 5313.
- [12] Komalan A, Palekar U, Vikhe DM, et al. Comparative evaluation using different sprue designs on marginal integrity and casting defects: an in vitro study. *World J Dent*. 2023; 14 (2): 113-7.
- [13] Penchev P. Digitally designed casting ring and sprue system-a contemporary approach to the casting process in dentistry. *Arch Mater Sci Eng* 2023; 119 (1).
- [14] Jain S, Mattoo K, Khalid I, et al. A study of 42 partially edentulous patients with single-crown restorations and implants to compare bone loss between crestal and subcrestal endosseous implant placement. *Med Sci Monit*. 2023; 29: e939225.
- [15] Sarna-Boś K, Skic K, Sobieszczański J, et al. Contemporary approach to the porosity of dental materials and methods of its measurement. *Intl J Molecul Sci* 2021; 22 (16): 8903.
- [16] Li D, Baba N, Brantley WA, Alapati SB et al. Study of Pd–Ag dental alloys: examination of effect of casting porosity on fatigue behavior and microstructural analysis. *J Mater Sci: Mater Med*. 2010; 21: 2723-31.
- [17] Chan D, Guillory V, Blackman R, Chung KH. The effects of sprue design on the roughness and porosity of titanium castings. *J Prosthet Dent* 1997; 78 (4): 400-4.
- [18] Herø H, Syverud M, Waarli M. Mold filling and porosity in castings of titanium. *Dent Mater*. 1993; 9 (1): 15-8.
- [19] Wu M, Augthun M, Schädlich-Stubenrauch J, et al. Numerical simulation of porosity-free titanium dental castings. *Eur J Oral Sci*. 1999; 107 (4): 307-15.
- [20] Pattnaik S, Karunakar DB, Jha PK. Developments in investment casting process—A review. *J Mater Process Tech* 2012; 212 (11): 2332-48.
- [21] Custer F, DeSalvo JC. The accuracy of castings produced by various investments. *J Prosthet Dent* 1968; 19 (3): 273-80.
- [22] Hsu HC, Kikuchi H, Yen SK, Nishiyama M, et al. Evaluation of different bonded investments for dental titanium casting. *J Mater Sci: Mater Med*. 2005; 16: 821-5.
- [23] Lombardas P, Carbanaru A, McAlarney ME, Toothaker RW. Dimensional accuracy of castings produced with ringless and metal ring investment systems. *J Prosthet Dent* 2000; 84 (1): 27-31.
- [24] Joshi S, Sanyal PK, Patil JA. Effects of casting methods over the composition stability of the dental casting alloy. *J Clin Diagn Res*. 2022; 16 (8).
- [25] Ansarifard E, Farzin M, Parlack AZ, et al. Comparing castability of nickel-chromium, cobalt-chromium, and non-precious gold color alloys, using two different casting techniques. *J Dent* 2022; 23 (1): 7.
- [26] Pradhan SR, Singh R, Banwait SS. 3D printing assisted investment casting of dental crowns for recycling of DMLS waste. *Arab J Sci Eng* 2023; 48 (3): 3289-99.
- [27] Lakshya K, Aditya K, Mattoo KA. Full mouth rehabilitation involving multiple cast post core as foundation restorations – Case report. *Int J Med Res Pharmac Sci* 2018; 5 (7): 11-15.
- [28] Gaba N, Mattoo KA, Daghi S. Base Metal Denture Bases-Clinical indications. *Am J Med Case Rep* 2022; 10 (3): 59-63.
- [29] Singh M, Singh S, Kumar L, et al. Evaluation of retentive strength of 50 endodontically-treated single-rooted mandibular second premolars restored with cast post cores using 5 common luting (cement) agents. *Med Sci Monit*. 2024; 30: e944110.
- [30] Mattoo K, Singh M, Goswami R. Cast foundation restoration for grossly decayed posterior teeth. *Int J Res Med Sci Technol* 2014; 1 (1): 9-10.
- [31] Yadav L, Mattoo KA, Kapoor A, Shuja S. Factors associated with post core correction of malpositioned teeth. *Int J Res Med Sci Technol* 2015; 1 (2): 5-7.
- [32] Kadokawa A, Murahara S, Kono H, et al. Physical properties of experimental light-curing pattern resins based on poly (n-butyl methacrylate) or poly (iso-butyl methacrylate). *Dent Mater J* 2024; 43 (4): 546-51.
- [33] Ageeli OE, Ibrahim RM, Aidhy FE, et al. Maxillary canine pier abutment management using fixed movable bridge design. *Am J Med Case Rep*. 2023; 11 (4): 67-70.
- [34] Minocha T, Mattoo K, Rathi N. An 2/2 implant overdenture. *J Clin Res Dent* 2020; 3 (1): 1-3.
- [35] Morsy MS, Hassan AA, Alshawkani HA, et al. Effect of Repeated Moist Heat Sterilization on Titanium Implant–Abutment Interface—An In Vitro Study. *Eur J Dent*. 2024; 18 (3): 860–868.
- [36] Sharma A, Kalra T, Jain S, et al. Comparative evaluation in linear dimensions among various interocclusal recording materials at various mounting times: an in vitro study. *World J Dent*. 2020; 11 (6): 462-7.
- [37] Ali FM, Alqahtani AS, Alenazi A, et al. Fusion between impacted distomolar and Third molar: A Rare case report with Review of Literature. *J Int Dent Med Res* 2024; 17 (4): 1731-39.

Modèle M'BUTI: Approche innovante de gestion de projet en RDC avec intégration de l'écriture Mandombe et réduction de la dépendance aux modèles scientifiques importés

[M'BUTI model: An innovative approach to project management in the DRC with integration of Mandombe script and reduction of dependence on imported scientific models]

Lukau Matezo Espoir¹ and Simon Malueki Matuasilu²⁻³

¹Étudiant Doctoral en Médecine et des sciences de la santé, Université de Sherbrooke, Assistant de recherche au Centre de recherche Charles-Le Moyne (CRCLM), Canada

²Doctorant en Management et Sciences économiques, Option: Management des Projets, Université du CEPROMAD, Kinshasa, RD Congo

³Enseignant à l'Université Simon Kimbangu (USK) et à l'Université Omnia Omnibus (UOO), Kinshasa, RD Congo

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

ABSTRACT: The article focuses on the M'BUTI incubator model, an innovative generator of projects in various sectors of life. It is inspired by Mandombe writing, a medium for ensuring the decolonization of knowledge. In conducting this study, we aim to explore how cultural imprints can enhance project conceptualization and management at the local level. The main question this research seeks to answer is that of measuring the effectiveness of applying local solutions to local problems. Using the non-probabilistic snowball method, we were able to draw up a sample of 180 Mandombists, enabling us to explore in the field the possibilities of designing models using Mandombe script symbols. The results show that the application of the M'BUTI model enhances the creativity of its users and stimulates innovation in various sectors. Its application has already enabled a dozen medical students at Kinshasa's Simon Kimbangu University to design medical instruments such as vein locators, catheters and rib management software, not to mention a number of Mandombe people who have developed several theories, including a «4P agricultural method» adapted to the rural environment. In conclusion, the M'BUTI model is an essential alternative in project management, taking into account the particularities of Congolese culture.

KEYWORDS: Incubator, Creativity, Local development, medical education, Technological innovation, Local solutions, Project management and Decolonization of knowledge.

RESUME: L'article se concentre sur le modèle d'incubateur M'BUTI, un générateur innovant de projets dans divers secteurs de la vie. Il s'inspire de l'écriture Mandombe, un support permettant d'assurer la décolonisation du savoir. En menant cette étude, nous souhaitons explorer comment les empreintes culturelles peuvent améliorer la conceptualisation et la gestion de projet au niveau local. La question principale à laquelle cette recherche tente de répondre est celle de mesurer l'efficacité d'appliquer des solutions locales à des problèmes locaux. Grâce au procédé non probabiliste de la boule de neige, nous avons pu constituer un échantillon de 180 personnes, parmi les mandombistes, qui nous a permis d'explorer sur le terrain les possibilités de concevoir des modèles avec les symboles de l'écriture Mandombe. Les résultats montrent que l'application du modèle M'BUTI améliore la créativité de ses utilisateurs et stimule l'innovation dans divers secteurs. Son application a déjà permis à une dizaine d'étudiants en médecine de l'Université Simon Kimbangu de Kinshasa de concevoir des instruments médicaux comme des

dispositifs de localisation des veines, des cathéters, des logiciels de gestion des côtes, sans oublier certains mandombistes qui ont mis en place plusieurs théories, dont une « Méthode agricole en 4P » adaptée au milieu rural. En conclusion, le modèle M'BUTI se veut une alternative essentielle dans la gestion de projet en tenant compte des particularités culturelles congolaises.

MOTS-CLEFS: Incubateur, Créativité, Développement local, Éducation médicale, Innovation technologique, Solutions locales, Gestion de projet et Décolonisation du savoir.

1 INTRODUCTION

La gestion joue un rôle essentiel dans les études d'économie et de gestion, car elle permet de structurer et de planifier les activités pour optimiser l'efficacité [1]. En République Démocratique du Congo (RDC), où les défis pour améliorer les conditions de vie sont nombreux, ce domaine est vital pour le développement socioéconomique et technologique [2]. Une méthode novatrice pour révolutionner la gestion de projet est illustrée par l'exemple de Mandombe, une innovation congolaise développée en 1978 par David Wabeladio Payi, inspirée par une révélation divine [3].

Les recherches de nos pionniers ont démontré que l'écriture Mandombe est une option essentielle pour la création, la gestion et la mise en œuvre de projets lorsqu'elle est en concurrence avec des modèles importés qui ne tiennent souvent pas compte du caractère unique culturel et socio-économique de la RDC [4].

Le modèle multifacteur Nsemi 1, développé sur la base des principes Mandombe de symétrie, de récursivité et de Lubamba, a été conçu par Kibavuidi pour aider à éliminer rapidement les causes d'échec [4]. Ce modèle se compose de quatre parties égales: l'innovation, le marché, l'offre commerciale et l'équipement.

Cependant, peu d'études ont mis l'accent sur l'importance d'une approche intégrative qui combine les modèles locaux avec les techniques de gestion de projet, et encore moins ont pris en considération l'écriture Mandombe ou d'autres aspects de la culture autochtone. Ce manque d'études soulève des préoccupations de recherche: comment la RDC peut-elle modifier ses propres paradigmes de gestion dans le domaine de la gestion de projet, plusieurs années après avoir adopté des modèles étrangers ? Comment le modèle MBUTI, qui combine les symboles et les principes de l'écriture Mandombe, peut-il réorganiser les pratiques managériales et briser les chaînes coloniales à l'égard des savoirs importés ? Cette réappropriation ne laisse-t-elle pas présager un changement profond dans la dynamique du pouvoir, les systèmes de connaissances et la gestion de la vie elle-même ?

De cela, la recherche actuelle se concentre sur la capacité à fournir un modèle de gestion de projet à la fois innovant et ancré dans la réalité congolaise. Notre objectif en utilisant l'écriture Mandombe est de valoriser les ressources culturelles et humaines de l'environnement. Cette méthode permet de réduire la dépendance aux modèles externes et de contribuer à des résultats plus efficaces et durables.

Les objectifs de cette étude sont de:

- Mettre en évidence l'ingénierie de création de modèles Mandombe que nous avons rendue rentable pour les chefs de projet.
- Évaluer le potentiel du modèle M'BUTI comme tant qu'approche innovante dans ce domaine lié au développement communautaire;
- Étudier comment l'intégration de l'écriture Mandombe peut améliorer la performance du projet RDC.

2 METHODES

2.1 CONCEPTION ET CADRE DE L'ÉTUDE

Notre étude est intéressée à enquêter les experts mandombistes, les gestionnaires d projet et les étudiants utilisateurs du modèle M'BUTI.

L'échantillon de cette population est composé de 180 personnes, dont 140 étudiants répartis en trois groupes:

- **Groupe T1:** Étudiants de L1 ayant appris l'écriture Mandombe, mais sans étudier le chapitre sur l'innovation avec les symboles de Mandombe.

- **Groupe T2:** Étudiants de L2 ayant étudié l'écriture Mandombe avec le chapitre sur l'innovation.
- **Groupe T3:** Étudiants de L3 inscrits spéciaux n'ayant pas étudié l'écriture Mandombe.

À ces trois groupes, nous avons évalué leur capacité de concevoir des modèles scientifiques à partir des symboles de Mandombe, mais aussi jauger leur pouvoir d'utilisation du modèle M'BUTI dont ils ont étudié les étapes et le contour. Les 40 autres participants sont des experts de Mandombe répartis à travers les pays où cette nouvelle science congolaise est pratiquée. Certains sont des spécialistes dans le domaine de gestion de projet. À cette catégorie de la population, nous avons voulu comprendre s'ils ont déjà mis au point des modèles de management de projet ou des algorithmes sur base de l'écriture Mandombe. L'idée est d'obtenir des perspectives variées.

2.2 SYMBOLES DE MANDOMBE ET PRINCIPES UTILISÉS

Nous avons utilisé deux catégories de symboles: les mvuala ou consonnables et les bisimba ou déterminatifs [5]. Chaque côté de mvuala et bisimba [2] représente une étape mieux identifiée par un nom qui rappelle l'action à réaliser au niveau du de différentes phases du projet [3].

Dans le processus de composition, combinaison et construction du modèle M'BUTI, le principe de Miroir grâce auquel l'image est symétrique de l'objet et/ou le reflet renvoie au même et à l'autre tout à la fois [6] a été utile pour symétriser les mvuala KETE et NDUNGU () d'une part, mais aussi de cinq derniers côtés de mvuala mpimpita ya lambuka ou angle de 45° [7] dénommé Nzula-Nsona et les cinq derniers cotés mvuala Mpimpita ya lambuka (angle de 135°) au nom de Nsinsu Nkandu (); entre les cinq derniers côtés du mvuala précédent aux cinq premiers côtés de Mvuala mpimpita ya butila (0°) qui s'appelle Nzu-nsona (0°) dont les cinq derniers sont symétriques au mvuala mpamba de la famille pakundungu, position Nkandu ().

En outre, la récursivité, nous avons tracé les différents symboles en passant par plusieurs itérations [4]. Le principe de lubamba quant à lui a permis de tracer tous les mvuala et certains bisimba de manière continue et/ou linéaire [6] sans lâcher l'outil scribeur. C'est le cas de mvuala nsinga luketo position nsona et mvuala ndungu position nkandu ().

2.3 MODÈLE D'INCUBATEUR M'BUTI

2.3.1 ORIGINE ET/OU ÉTYMOLOGIE

La plupart des modèles de management de projet que nous avons appris et dont se servent les experts en gestion de projet en RDC sont non seulement complexes, mais aussi ne tiennent pas compte des réalités culturelles locales. Voilà pourquoi nous avons mis au point le modèle M'BUTI pour repenser ce secteur stratégique.

Étymologiquement le modèle M'BUTI, susceptible de servir de support de création des projets innovants et d'envisager le management autrement, est un acronyme né de la fusion des lettres initiales de chacun des mots Kongo suivants utilisés en Mandombe: M'vuala (M') et Butila (Buti). Cet acronyme correspond heureusement au mot Kongo qui veut dire géniteur. En Mandombe, ce rôle de géniteur est joué par le « singini » (●) qui n'est autre que le point de départ pour écrire tout symbole de Mandombe [4] d'une part et l'élément numériquement insignifiant capable de générer une multitude de phénomènes [8] d'autre part. Cette découverte nous ayant ouvert les yeux, nous avons recouru à la stratégie de la conceptualisation pour parvenir à mettre au point le Modèle d'incubateur & de management M'BUTI. Nous suivons ainsi le phénomène de naissance du premier ancêtre M'BUTI jusqu'à toutes les générations homonymes symbolisant des actions diverses.

2.3.2 ÉNONCÉ DU MODÈLE M'BUTI

Chaque concept, chaque phase de départ donne naissance à une logique d'action ou un concept-géniteur qui n'est autre que M'BUTI, mais dont la signification contextuelle et sémantique peut différer du concept géniteur précédent. Ainsi, quelle que soit la phase du projet et le mot qui l'exprime, les étapes à suivre ou la logique qu'il faut suivre se nomme M'BUTI, c'est-à-dire capable de générer, de faire naître.

C'est exactement comme le singini. Quelles que soient les différentes générations itératives, tout symbole qu'il fait naître à ses traces héréditaires. M'BUTI est également un modèle du management de projet innovant.

2.3.3 FONCTIONNEMENT DU MODÈLE

Le modèle M'BUTI consiste à créer et innover des projets, des algorithmes et des concepts nouveaux dans divers domaines, visant à générer des projets innovants à piloter selon le management qu'il propose. Il est structuré autour de trois grands axes: axes-miroir, phases-conducteur et phases des méthodes.

2.3.4 AXES-MIROIR

Dans sa conceptualisation et sa configuration physiologique, M'BUTI est structuré en trois grands axes-miroir à savoir les phases (définition des étapes clés du projet), les méthodes (approches pratiques pour l'exécution des projets) et l'organisation managériale (structures et processus nécessaires pour une gestion efficace). Les trois axes-miroir convergent vers la toile conceptuelle M'BUTI pour symboliser: la Matrice, le Baseline, l'Unité, les Tâches et les Indicateurs baignée dans un fond jaune qui traduit la création de la richesse.

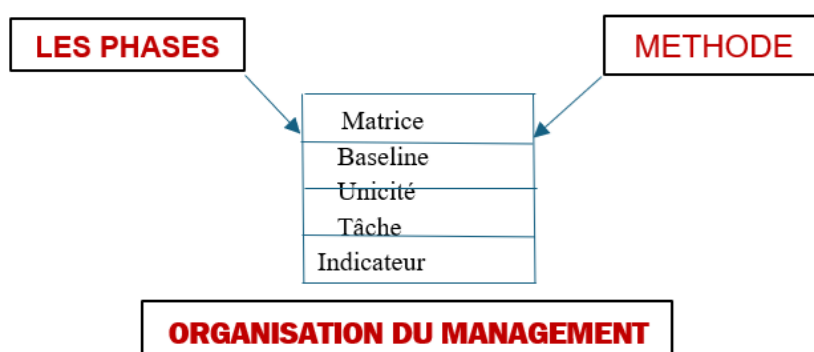


Fig. 1. Axes-miroir du modèle d'incubateur M'BUTI

2.3.5 PHASES-CONDUCTEUR

Inc1lut la Mission, le Besoin, l'Utilisateur, les Tensions et l'Innovation. Chaque phase doit être suivie pour réaliser l'innovation par l'écriture Mandombe.

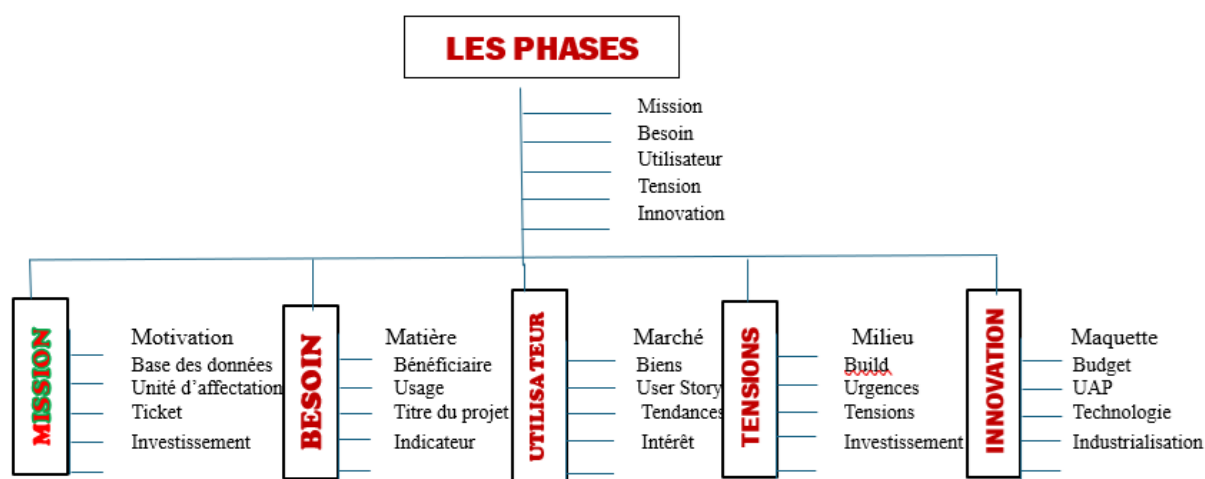


Fig. 2. Phases-conducteur du modèle d'incubateur M'BUTI 2

Notons que Les phases-application sont l'émanation des phases-conducteur. Il s'agit des différentes applications qui découlent de chaque phase-conducteur mais dont le contenu de chacune d'elles symbolise la toile conceptuelle M'BUTI.

- La phase-conducteur mission a donné la toile M'BUTI pour traduire la Motivation, la Base des données, l'Unité d'affectation, le Ticket et l'Investissement;

- La phase-conducteur besoin a conduit à la toile M'BUTI suivante: la Matière, le Bénéficiaire, l'Usage, le Titre du projet et l'Indicateur;
- La phase-conducteur utilisateur a procuré la toile M'BUTI pour symboliser le Marché, les Biens, l'User story, les Tendances et l'Intérêt;
- La phase-conducteur tension se résume à la toile M'BUTI qui se corrobore avec le Milieu, le Build, les Urgences, les Tensions et l'Investigation;
- La phase-application innovation s'articule autour de la toile conceptuelle M'BUTI qui se traduit en ces termes: la Maquette, le Budget, l'UAP (Unité Autonome de Production), la Technologie et l'industrialisation.

2.3.6 PHASES DE MÉTHODES

Elles comprennent l'utilisation d'outils et de techniques spécifiques pour garantir l'efficacité du projet. Les méthodes adoptées peuvent inclure des pratiques telles que le brainstorming, les études de cas, et l'élaboration de manuels de procédures.

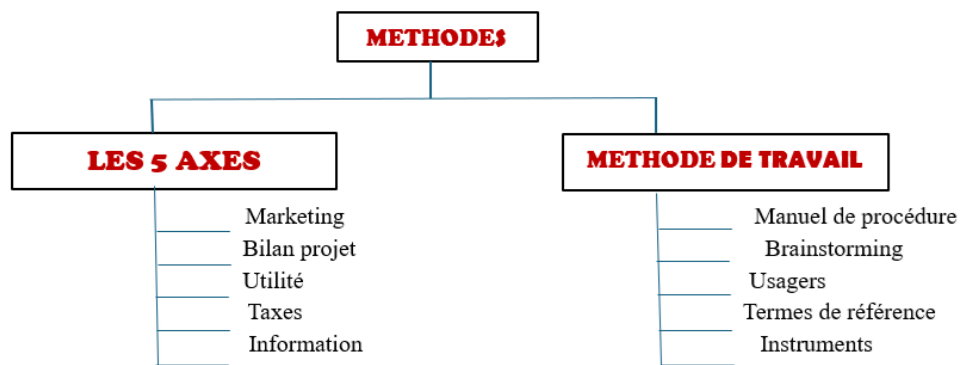


Fig. 3. Méthodes du manager dans le Modèle M'BUTI 4

2.3.7 PHASES D'ORGANISATION MANAGÉRIALE

2.3.7.1 AXE DU RESPONSABLE

L'axe du responsable décrit les moyens nécessaires pour la mise en œuvre efficace du projet, incluant la gestion des ressources, les indicateurs de performance, et la gestion des risques.

2.3.7.2 AXE DES TÂCHES DU CHEF DE PROJET

L'axe de tâches du Chef de Projet englobe le macro-planning, le suivi des activités, et la communication avec les parties prenantes.

2.3.7.3 AXE DE L'ÉQUIPE

Au niveau de l'équipe, on met en avant l'importance d'une équipe bien formée et engagée, avec un accent sur la collaboration et le partage des connaissances.

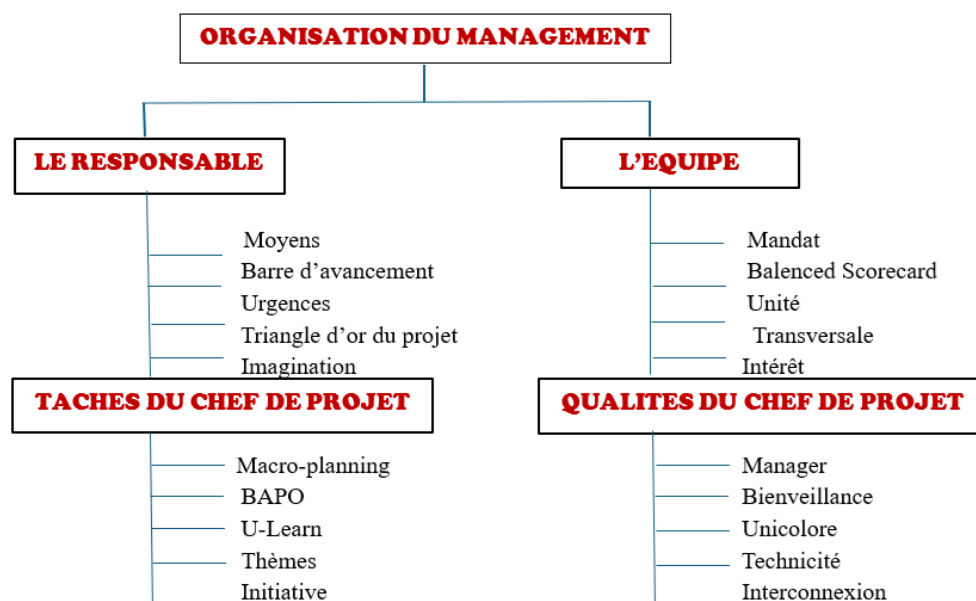


Fig. 4. Réseau des axes et toiles managériales du modèle M'BUTI 3

2.3.8 PARTIE MATHÉMATIQUE ARCHITECTURE DU MODÈLE M'BUTI

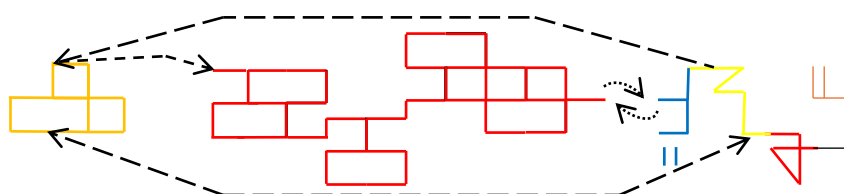


Fig. 5. Architecture de Modèle d'incubateur M'BUTI

2.3.9 INTERPRÉTATION DE L'ARCHITECTURE

2.3.9.1 AXES-MIROIR (A)

Il convient de comprendre que les axes-miroir, comme représentés par les Bisimba — éléments déterminatifs en Mandombe —, ne sont pas de simples symboles; ils sont le point de départ d'une dynamique créative. Leur choix initial n'est pas anodin, car ils constituent le fondement sémantique qui confère une signification au mot et qui détermine la nature des syllabes ainsi que les positions des Mvuala. Dans le cadre du Modèle M'BUTI, ces axes-miroir deviennent les points d'ancrage essentiels à la genèse de tout projet.

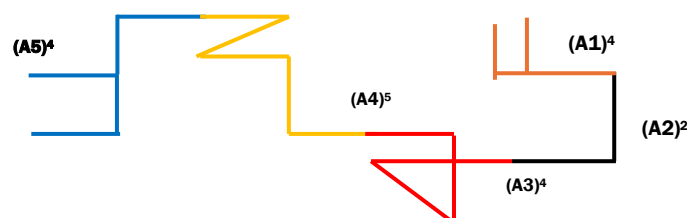


Fig. 6. Vue schématique de M'BUTI 1

Légende: A= axe-miroir, 1, 2, 3, 4, 5 ce sont le nombre d'axes (miroir). Les chiffres à l'extérieur des parenthèses symbolisent les composantes essentielles pour chaque axe.

Ainsi, les initiales de la toile des axes-miroir se présentent comme suit: A1, A2, A3, A4 et A5.

- **(A1) 4**=Matrice (Objectifs du projet, Ressources, Échéancier et Indicateurs de performance)
- **(A2) 2** = Baseline (Qualité de référence et portée de référence)
- **(A3) 4** = Unicité (Parties prenantes, Méthodologies et Approches, Contexte, **Livrables**)
- **(A4) 5** = Tâche (Dépendances, risques, budget, documentation et statut)
- **(A5) 4** = Indicateur (Nom de l'indicateur, définition, méthode de calcul et cible)

2.3.9.2 PHASES-CONDUCTEUR, PHASES-APPLICATION ET PHASES D'ORGANISATION MANAGERIALE DU MODELE M'BUTI

La structure de l'architecture du Modèle d'incubateur se compose, dans son essence, des mvuala, ces angles temporels qui s'articulent selon différents degrés de signification. Le schéma prend son essor à partir du mvuala mpamba, situé à la position nsona, et évolue en intégrant sa symétrie (position nkandu), mvuala nzula-nsona (45°), mvuala nsika-nkandu (135°), nsi-nsona (0°), nsinsu (0°) et ndungu-piluka.

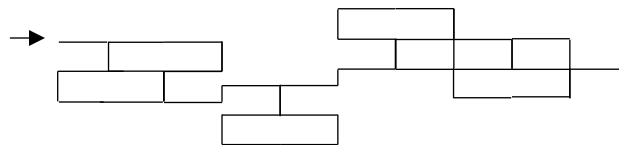


Fig. 7. Schéma des phases-conducteur, d'application et d'organisation du modèle M'BUTI 2 & 3

Ce schéma, articulé selon le principe de Lubamba, débute par le premier côté de mvuala mpamba (pele) à la position nsona et se conclut après le sixième côté de mvuala ndungu-piluka. Une totalisation de 50 étapes se déploie, chaque côté de mvuala représentant des dimensions distinctes des toiles conceptuelles, tant dans les phases-conducteur que dans les phases d'application et d'organisation managériale du Modèle M'BUTI.

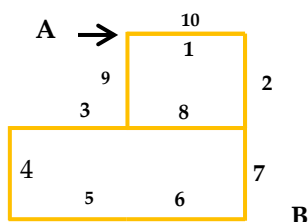
Par rapport à la disposition des phases toilées, la représentation schématique ci-dessus illustre les toiles comme suit:

- Du 1er côté au cinquième de mvuala pele: phases-conducteur;
- Du 6ème côté au 10ème de mvuala ndungu: phase-application Mission toilée;
- Du 11ème côté au 15ème de mvuala nzula-nsona: phase-application Besoin toilé;
- Du 16ème côté au 20ème de nzula-nsona: phase-application Utilisateur toilé;
- Du 21ème côté au 25ème de nsinsu-nkandu: phase-application Tensions toilées;
- Du 26ème au 30ème de nsinsu-nkandu: phase-application Innovation toilée;
- Du 31ème au 35ème de nsinsu-nkandu et nzu-nsona: phase-organisation Responsable toilé;
- Du 36ème côté au 40ème de nzu-nsona: phase-organisation Équipe toilée;
- Du 41ème côté au 45ème de nzu-nsona et ndungu-piluka: phase-organisation Tâches toilée;
- Du 46ème côté au 50^{ème} de ndungu-piluka: phase-organisation Qualité toilée.

2.3.10 VISUALISATION DES PHASES-METHODES DU MODELE M'BUTI

Les phases-méthodes du Modèle M'BUTI sont construites avec deux mvuala distincts. Le premier, Nsinga luketo (singleton), est l'une des composantes de la famille des mvuala irréguliers [9] tandis que le second, mvuala mpamba (simple) est la base de l'écriture mandombe [4]. Chacun d'eux compte cinq côtés, correspondant aux toiles conceptuelles M'BUTI, symbolisant soit des axes d'intervention, soit des méthodes de travail.

2.3.11 ILLUSTRATION DU SCHÉMA PHASES-MÉTHODES



a) Légende: (A) 5 et (B) 5

Le modèle d'incubateur M'BUTI se divise en deux dimensions majeures: les axes d'intervention et les méthodes de travail du manager.

b) Disposition des phases-axes et méthodes

- Du 1er côté au cinquième: phases des axes d'intervention;
- Du 6ème côté au 10^{ème}: phases de méthodes de travail.

2.4 QUESTIONNAIRE ET AUTRES OUTILS

Dans notre étude, le questionnaire, utilisé comme outil primordial de collecte des données, a intégré plusieurs méthodes pour assurer la fiabilité des réponses. Inspirés par des méthodologies reconnues [10], nous avons opté pour deux types des questions: à choix multiple et ouvertes. Les premières proposaient des options prédéfinies, facilitant ainsi l'analyse statistique des réponses [12], tandis que les secondes permettaient aux répondants de s'exprimer librement sur l'innovation et la modélisation des problématiques autour de l'écriture Mandombe.

Nous avons également eu recours à des outils modernes de collecte de données, tels que Qualtrics et Google Forms, dont les fonctionnalités interactives ont permis de suivre les données en temps réel et d'adapter le parcours des questions en fonction des réponses précédentes [13]. De plus, des chatbots intégrés sur des plateformes comme Facebook Messenger [17] ont enrichi l'interactivité du questionnaire en accompagnant les participants tout au long de l'enquête, rendant le processus de réponse plus accessible et dynamique.

Dans certaines régions ciblées, telles que Bujumbura, Lagos et Haut-Katanga, nous avons employé des applications de géolocalisation, comme Pollfish, pour obtenir des données plus précises et adaptées aux spécificités locales [15]. Enfin, des questionnaires multimédias via VideoAsk ont offert une expérience immersive aux répondants, leur permettant de partager leurs réponses sous forme de vidéo ou d'audio [16].

2.5 MÉTHODES

2.5.1 MÉTHODE HISTORIQUE ET D'ENQUÊTE

La méthode historique s'intéresse à l'analyse des faits passés à travers des documents [14]. En ce qui concerne, avons exploré des archives, des textes et des publications antérieures concernant l'écriture Mandombe, la gestion de projet et la modélisation en vue d'établir un cadre théorique et contextuel solide pour cette étude.

Grâce à cette méthode, nous avons contacté les experts et utilisateurs de l'écriture Mandombe. Des questionnaires ont leur été administrés et les réponses ont été analysées pour dénicher leurs perceptions et niveaux de compréhension de l'écriture Mandombe. Concrètement, nous avons posé des questions à ces 40 experts pour chercher à déterminer s'ils avaient, après plusieurs années d'utilisation de l'écriture Mandombe, développé des modèles d'innovation de projet basés sur cette nouvelle science, dans le but d'obtenir des perspectives variées [11].

2.5.2 MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

2.5.2.1 TEST DE PERFORMANCE

Selon une étude menée par Trésor KIBAVUIDI NSIANGANI (2006), le Mandombe accroît les facultés de mémorisation, d'analyse, de visualisation, de traitement logique qui permet de développer de nouvelles connexions neuronales [19]. Cela étant, l'objectif du test de performance était de se rendre compte de l'influence de Mandombe auprès des enquêtés. Il s'agit d'évaluer les connaissances et les compétences acquises en écriture Mandombe par les groupes T1 (L1) et T2 (L2) en comparaison avec le groupe T3 (L3), qui n'a pas suivi de formation en Mandombe.

Le format utilisé pour ce test se présente comme suit:

1) Population testée:

Groupe T1 (L1): Apprenants de niveau 1 ayant acquis les bases de l'écriture Mandombe.

Groupe T2 (L2): Apprenants de niveau 2 ayant une connaissance intermédiaire de l'écriture Mandombe, c'est-à-dire les techniques d'innovation à partir de mandombe

Groupe T3 (L3): Groupe témoin sans formation préalable en Mandombe.

2) Conditions expérimentales:

Chaque groupe a suivi des exercices standardisés pour tester les compétences de lecture, d'écriture, de reconnaissance des caractères Mandombe, de la visualisation et de la mise en valeur des symboles dans divers domaines. Des tâches spécifiques (comme l'identification de symboles et la transcription de phrases) ont été conçues pour chaque niveau.

3) Procédures expérimentales:

Phase 1: Pré-test pour établir les compétences de base de chaque participant avant l'intervention.

Phase 2: Application de modules d'apprentissage pour T1 et T2, avec un suivi intensif pour évaluer leur progression.

Phase 3: Post-test identique pour tous les groupes afin de comparer les performances après formation, en mesurant la précision, la vitesse et la capacité de reproduction des caractères Mandombe, mais également les aptitudes à concevoir et mettre en valeur les différents éléments constitutifs de cette écriture.

2.5.2.2 ANALYSE DES RÉSULTATS

Les scores de performance des groupes T1, T2 et T3 ont été comparés à l'aide de tests statistiques, tels que le test t pour échantillons indépendants et l'ANOVA.

Les différences de progression entre T1 et T2 ont été analysées afin de déterminer l'efficacité des niveaux de formation. Dans le souci d'affiner une analyse statistique fouillée des données collectées, nous avons utilisé des logiciels spécialisés, IBM SPSS, version 25 [20].

3 RESULTATS

L'échantillon de notre étude, fort de 180 participants, se révèle riche en diversité démographique, offrant ainsi une précieuse illustration des différents profils impliqués dans l'évaluation du modèle M'BUTI. Les caractéristiques des répondants sont présentées de manière détaillée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1. Caractéristiques démographiques des participants

Variable	Fréquence	Pourcentage
Âge des répondants		
18-25 ans	36	20
26-45 ans	108	60
> 45 ans	36	20
Sexe des enquêtés		
Homme	93	52
Femme	87	48
Profession		
Commerçant	63	35
Fonctionnaire	45	25
Agriculteur	36	20
Travailleur informel	36	20
Enseignant	18	10
Chercheur en Mandombe	27	15
Étudiant	9	5
Niveaux d'études		
Primaire	54	30
Secondaire	90	50
Supérieur	36	20

Les résultats de notre enquête révèlent une série d'insuffisances dans la gestion de projet en RDC, insuffisances principalement imputables à l'inadéquation des modèles importés vis-à-vis des réalités locales. Ces failles, analysées ci-après, s'avèrent révélatrices d'une fracture profonde entre l'approche traditionnelle et les besoins concrets du terrain.

Tableau 2. Insuffisances du management de projet en RDC

Insuffisance	Description	Fréquence	Pourcentage
Connaissance insuffisante	Difficulté à saisir et à appliquer les processus du projet	120	66,7
Manque de clarté des besoins	Absence de définition précise des attentes et objectifs	100	55,6
Absence de consensus	Insuffisance d'accord sur les priorités	90	50
Méconnaissance des étapes	Manque de compréhension des phases du projet	80	44,4
Inadaptation contextuelle	Application de normes étrangères sans adaptation locale	110	61,1
Copie de modèles importés	Transposition non critique des modèles étrangers	85	47,2
Incohérence des mentalités	Divergences entre bailleurs et populations locales	95	52,8

Ces résultats soulignent des disparités notables entre les attentes des bailleurs de fonds et les réalités du terrain. La méconnaissance des spécificités culturelles et linguistiques, de même que l'absence de consensus sur les priorités, figurent parmi les facteurs cruciaux d'échec des projets. En ce sens, le modèle M'BUTI apparaît comme une réponse potentielle pour remédier à ces défis.

L'enquête a également permis de mettre en lumière une riche palette de stratégies d'innovation déployées par les chercheurs Mandombe dans leurs démarches de modélisation.

Tableau 3. Stratégies d'innovation des chercheurs Mandombe

Stratégie d'innovation	Fréquence	Pourcentage
Modélisation	113	63
Conceptualisation	24	13
Codification	16	9
Mathématisation	13	7
Systématisation	20	11
Collaboration	100	55,6

Ces stratégies témoignent d'un engagement soutenu des chercheurs à élaborer des solutions en phase avec le contexte local. La modélisation, principale approche adoptée (63 %), est suivie par la collaboration (55,6%), la conceptualisation (13%) et la systématisation, montrant une orientation collective et méthodique dans la quête de solutions adaptées.

En comparaison avec les modèles d'innovation importés, comme Six Sigma, Lean Manufacturing, et Agile, le modèle M'BUTI se distingue par son ancrage dans les réalités culturelles de la RDC, utilisant les ressources et valeurs indigènes comme socle d'innovation. Par son approche collaborative et sa pertinence contextuelle, M'BUTI incarne une alternative potentiellement durable et innovante pour le développement local.

Les réponses des participants révèlent des avis favorables sur l'utilisation du modèle M'BUTI, notamment:

- **Adaptation:** 70 % estiment que M'BUTI correspond mieux aux réalités congolaises que les modèles étrangers.
- **Efficacité perçue:** 65 % perçoivent M'BUTI comme favorisant une meilleure gestion par rapport à des approches importées.
- **Connaissance de Mandombe:** 80 % des participants montrent une bonne maîtrise de l'écriture Mandombe, renforçant la pertinence du modèle.

Des étudiants de l'Université Simon Kimbangu de Kinshasa ont déjà expérimenté M'BUTI dans des projets pratiques, notamment en concevant des instruments médicaux innovants.

Reconnu pour sa flexibilité, le mode projet est celui privilégié pour le développement des offres innovantes [21]. Voilà pourquoi en appliquant le modèle M'BUTI, 55 % des étudiants ont mis au point des dispositifs médicaux tels que des cathéter-bracelets et des outils de localisation veineuse, en s'appuyant sur les symboles et principes de Mandombe.

Les réseaux sociaux jouent un rôle capital, facilitant des échanges constants entre praticiens et renforçant l'appropriation du modèle.

Bien que toujours en phase expérimentale, le modèle a suscité un enthousiasme notable, avec un taux de satisfaction de 90 % parmi les étudiants. Ceci nous fait penser à l'affirmation de [22] selon laquelle la modélisation réussie, passe toujours par le respect strict des indicateurs (clés) comme dessiner un bon graphique, éviter le plagiat, rechercher la légitimation des modèles, reconnaître que dans tout modèle, il y a à la fois, plus ou moins, ce que le modélisateur initial a voulu y mettre.

Les tests ont comparé l'efficacité de M'BUTI avec celle de modèles traditionnels, révélant une supériorité dans plusieurs critères, notamment l'adaptabilité et l'innovation.

Tableau 4. Performances des groupes

Critère de performance	Groupe M'BUTI	Groupe traditionnel
Efficacité du projet	85	60
Respect des délais	90	70
Satisfaction des parties prenantes	80	55
Adaptabilité au contexte local	95	40
Innovation générée	85	50

Les données du tableau 4 indiquent que le modèle M'BUTI a satisfait plus d'un chercheur dans son application. La plupart (70%) ont pointé du doigt le respect des délais pour accomplir les actions. Comme souligné par Van der Panne, Van Beers et Kleinknecht (2003) [23] le temps d'introduction de l'innovation sur le marché est également identifié comme un facteur d'impact du succès du projet. Il est suivi de ceux qui ont atteint aisément leurs objectifs (60%) traduisant l'efficacité du projet.

Une autre catégorie d'enquêtés a estimé que M'BUTI leur permis de générer les innovations, d'asseoir la satisfaction des parties prenantes.

Les participants ont souligné trois principaux points forts du modèle M'BUTI: son adaptabilité culturelle, son approche collaborative, et sa capacité à encourager l'innovation. Les suggestions d'amélioration incluent une meilleure formation et documentation, ainsi qu'un suivi renforcé.

Enfin, les 40 experts en Mandombe consultés pour l'étude ont rapporté divers usages innovants de cette écriture dans leurs disciplines respectives, notamment en mathématiques, en informatique (système d'exploitation *Nzitani*), et en agriculture (méthode en 4P inspirée des positions Mandombe). Environ 75 % de ces experts ont réussi à conceptualiser des modèles de projet, tandis que 10 % ont adopté Mandombe comme thématique académique dans des thèses et mémoires, démontrant ainsi son potentiel créatif et sa contribution à l'avancement des savoirs.

4 DISCUSSION

Le constat fait au niveau de l'analyse démographique est que les participants à l'enquête sont, pour la plupart, âgés de 26 à 45 ans (60 %). L'importance du poids de cette tranche d'âge, comme se sont interrogés Madelaine Gauthier et Mégane Girard (2008), intervient dans plusieurs secteurs d'activité pour en influencer la direction. Même si Daniel Alaphilippe (2024) souligne que les apprentissages restent possibles à tous les âges, jusqu'en fin de vie, ajoute-t-il, on peut acquérir de nouveaux savoirs et savoir-faire qui permettent de demeurer dans une dynamique de développement (Alaphilippe, 2024). Le Modèle M'BUTI pourrait répondre efficacement aux besoins d'une grande population active sans omettre celle qui est déjà vieille.

À côté de cet aspect, l'intérêt pour M'BUTI est manifeste par la diversité professionnelle au sein de l'échantillon, notamment avec des commerçants, des fonctionnaires et des travailleurs informels. Cela démontre à suffisance que l'écriture Mandombe est utilisée par des personnes de profils variés et provenant de milieux économiques différents.

Les résultats observés sur la diversité et l'adaptabilité de M'BUTI sont cohérents avec les recherches récentes, qui soulignent l'importance d'adapter les modèles de gestion de l'innovation aux spécificités locales pour garantir leur efficacité. Ainsi, tout comme l'innovation, le projet est un concept très en vogue et utilisé dans de nombreuses organisations et situations différentes [21].

Les critères d'évaluation de projet, étant susceptibles d'être enrichis, devraient inclure l'acceptation par les consommateurs (Kerzner, 2003 cités par Estelle Zoungrana, 2020). Cela implique l'intégration des réalités culturelles et les attentes des parties prenantes locales.

De plus, comme le mentionnait Nina Obuljen (2009), la culture, source d'identité, est également un puissant facteur d'innovation économique et sociale ainsi que de mobilisation pour des projets de développement. Cette ressource non délocalisable pour le développement recèle un fort potentiel d'attractivité économique, et sait créer des emplois, générer des revenus et des investissements, tout en offrant une matrice dans laquelle chacun peut inventer les conditions de son développement [21]. C'est pourquoi Plos One (2022) avertissait que les projets qui n'adaptent pas leur méthodologie à des contextes culturels spécifiques échouent souvent [24]. Ceci est particulièrement pertinent dans les pays en développement comme la RDC, où l'imposition de normes externes ne correspond pas toujours aux besoins locaux [2].

Au vu des résultats obtenus sur terrain, il est clair de mentionner que le modèle M'BUTI a un potentiel pour devenir une alternative de gestion de projet en RDC. Il est capable de pallier les insuffisances des modèles importés. Cette nouvelle manière de voir le projet s'adapte au contexte culturel. Ce qui fait que M'BUTI encourage une meilleure acceptation et appropriation des méthodes de gestion. Les implications de cette adoption pourraient aller au-delà de la RDC et être applicables dans d'autres contextes culturels similaires, où les modèles importés ont montré leurs limites.

Pour permettre une utilisation optimale de ce modèle, un grand processus de la formation de gestionnaires de projet s'impose. Cette action va pouvoir renforcer la capacité d'innovation et de développement endogène.

LIMITATIONS DE L'ETUDE

Il est vrai que nous avons obtenu les résultats concluants à travers l'échantillon des personnes qui maîtrisent l'écriture Mandombe et la gestion de projet. Toutefois, sa taille du point de vue géographique peut s'avérer limiter s'il faut généraliser les résultats pour tous les pays en développement. De plus, même si les effets de M'BUTI sont palpables depuis son utilisation en 2022, par le biais de quelques réalisations en milieux académiques et professionnelles, l'absence de mesures longitudinales en limite l'évaluation à long terme. D'où la nécessité d'élargir l'échantillon pour étendre l'étude dans une dizaine ou vingtaine

de pays d'Afrique, question de s'assurer sur la durabilité de ce nouveau modèle dont la totalité de sa structure miniaturisée est issue des symboles de Mandombe.

5 CONCLUSION

En conclusion, la présente étude a démontré que le modèle M'BUTI, dont la conception tire ses fondements dans l'écriture Mandombe, constitue une réponse innovante et efficace aux insuffisances de la gestion de projet en RDC. Grâce à son adaptabilité et à son enracinement dans les réalités culturelles locales, il est capable de contourner les modèles importés en offrant des solutions mieux adaptées aux besoins congolais, même si cette écriture n'est pas encore apprise par un grand nombre de ce peuple qui en est bénéficiaire.

Les participants, issus d'un échantillon diversifié, ont validé la pertinence et l'efficacité du modèle, tandis que des tests de performance et des projets pratiques ont confirmé sa supériorité en termes de satisfaction des parties prenantes et de résultats obtenus.

Par ailleurs, M'BUTI propose une alternative durable, non seulement pour la RDC, mais potentiellement pour d'autres contextes similaires en Afrique dont les expériences ont été réalisées avec quelques pays comme le Cameroun, la Guinée Equatoriale, le Burundi, la Côte-d'Ivoire. Les implications futures incluent la nécessité d'une formation massive des gestionnaires et une expansion des recherches pour intégrer davantage l'écriture Mandombe dans divers secteurs.

En somme, ce modèle dont les composantes graphiques et non nominales sont faites des symboles de Mandombe, ouvre la voie à une gestion de projet plus endogène, efficace et culturellement pertinente, contribuant ainsi à un développement durable.

LES CONFLITS D'INTERETS

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont aucun intérêt concurrent.

REFERENCES

- [1] Araza, Leemon L. 2017. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)*. 6th ed., Project Management Institute: s.n., 2017.
- [2] Bank, World. 2016. *Digital Dividends*. s.l.: World Bank, 2016.
- [3] Malueki Matuasilua, S. 2023. Du Mandombe aux modèles d'innovation: une conceptualisation nouvelle du management de projet par l'écriture mandombe, mémoire de DEA, université du CEPROMAD, Kinshasa, 2023.
- [4] Nsiangani, Kibavuidi. 1999. L'écriture Mandombe et la gestion de projet en RDC. Kinshasa: s.n., 1999.
- [5] Diankenda Paul, Le fonctionnement de l'écriture mandombe, ed. du. CENA, Kinshasa, 2001.
- [6] Pomel, Fabienne. 2016. Histoire de la révélation de l'écriture mandombe. 2016.
- [7] Benga Kia Tumua, M.,. 2009. *Abécédaire de Mandombe: manuel d'apprentissage individuel*. Kinshasa: éd. Idées Gisements, 2009.
- [8] KIBAVUIDI NSIANGANI, The Mandombe learning Paradigm, Thèse de doctorat en éducation/Pédagogie, Harvard Graduate School of Education, Cambridge, 1999.
- [9] Kibavuidi Nsiangani, Kimbangu et le symbole du Bélier, étude systématique des écritures africaines, une approche anthropologique, culturelle et neurolinguistique Éditions EHESS, Paris, 2006.
- [10] Philippe Baumard, Carole Donada, Jérôme Ibert et Jean-Marc Xuereb, « Chapitre 9. La collecte des données et la gestion de leurs sources » dans l'Ouvrage: *Méthodes de recherches en Management*, 4^{ème} édition, 2014, Pages 261 à 296 e ligne sur: <https://shs.cairn.info/publications-de-philippe-baumard--21758?lang=fr>.
- [11] Creswell, JW, Conception de la recherche: approches qualitatives, quantitatives et mixtes (4e éd.). Thousand Oaks, CA: Sage, (2014). Cité par Norma Ghamrawi, Najah AR Ghamrawi, Tarek Shal, Les écoles publiques libanaises: écoles du XXe ou du XXIe siècle ? Une enquête sur les pratiques pédagogiques des enseignants.
- [12] Rensis Likert, « A Technique for the Measurement of Attitudes », Archives of Psychology, vol. 140, 1932, p. 1-55 – en ligne sur: https://legacy.voteview.com/pdf/Likert_1932.pdf, consulté le 11 octobre 2024.
- [13] Jansen, J. et O'Ryan, E. Apprendre sous confinement: la voix des enfants d'Afrique du Sud. CNA Holdings (Pty) Ltd. (2020).
- [14] Crowley & Heyer, 2015. Après vérification, les informations sur le document ont été données par Charles Seignobos, La méthode historique appliquée aux sciences sociales, éd. Flix Alcan, Paris, 1901, 322p.en ligne sur URL: <http://www.ens-lyon.fr/editions/catalogue>, consulté le 28 décembre 2024, ç 9h25 Journal mondial du diabète.

- [15] Tobias Konitzer, Stephanie Eckman, 2024. Mobile as Survey Mode, Research October 2016, en ligne sur: <http://www.asasrms.org/Proceedings/y2016/files/389844.pdf>, consulté le 28 décembre 2024, 12h30 Informations sur l'auteur.
- [16] Lee, KC et Kwok, CC 1988. Sociétés multinationales et sociétés nationales: facteurs environnementaux internationaux et déterminants de la structure du capital. *Journal of International Business Studies*, 19, 195-217.
- [17] Ming-Hui Huang & Roland T. Rust. 2021. « Un cadre stratégique pour l'intelligence artificielle en marketing », *Journal of the Academy of Marketing Science*, Springer, vol. 49 (1).
- [18] Kibavuid: Nsiangani. 2006. *L'Afrique Berceau de l'écriture, du Kiduma au Mandombe au Kongo*, éditions EHESS, Paris.
- [19] Testu François, Alaphilippe Daniel, Chasseigne Gérard, Cheze M. T. Variations journalières de l'activité intellectuelle d'enfants de 10-11 ans en fonction de conditions psychosociologiques de passation d'épreuves, dans *L'année psychologique*. 1995 vol. 95, n°2. pp. 247-266.
doi: <https://doi.org/10.3406/psy.1995.28822> https://www.persee.fr/doc/psy_0003-5033_1995_num_95_2_28822.
- [20] Field, A. 2013. *Découvrir les statistiques avec IBM SPSS Statistics: et le sexe, la drogue et le rock « N » Roll*, 4e édition, Sage, Los Angeles, Londres, New Delhi.
- [21] Zoungwana, Estelle. 2020. *Analyse des facteurs déterminants de l'impact des projets d'innovation sur la performance globale des PME transformatrices de métal: cas de SOTREM et d'industries GRC au Saguenay*, Thèse de doctorat en management de projets. Québec: s.n., 2020.
- [22] Atshwel-Okel Mutungi, G. 2021. *Management approfondi*, Séminaire 3ème cycle en Management et sciences économiques. Kinshasa: Université du CEPROMAD, 2021. p.46.
- [23] Van der Panne, G., Van Beers, C., Kleinknecht, A. 2003. *Success and Failure of Innovation: A literature Review*. s.l.: International Journal of Innovation Management, 2003. 7 (3), 309-338.
- [24] One, Plos. 2022. *How Project Managers' Competencies Impact Project Success: A Systematic Literature Review*. 2022.
- [25] Obuljen, 2009. *Nina Culture and Creative Ecologies and the promotion of cultural diversity*//Forum for Creative Europe Prague: A Collection of Contributions. Prag: the Arts Institute - Theatre Institute,. str. 37-37.

Advancing while identifying constructive lines from West African pearl millet accessions for future hybrid breeding

Issaka Ahmadou¹, Maïnassara Habibou¹, Idrissa Tahirou Hassane¹, Datoloum Narcisse², Boubacar Adamou Djamila¹, Issa Hamidou Zakari¹, and Maman Issa Yahaha¹

¹Institut National de la Recherche Agronomique du Niger (INRAN), Niger

²Institut Chadien de Recherche Agronomique pour le développement (ITRAD), 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: The identification of parental genetic material that will provide crosses with high heterosis for grain yield and its stability is the most important factor in hybrid millet breeding in the arid zones of Asia and Africa. Self-pollination method along with directional selection was used to develop advanced lines from four improved varieties and landraces: Gamoji, HKB, HKP-GMS, and Moro-R. A total of 131 progenies of S₅ to S₁₁ generation were screened along four years under natural downy mildew infestation in Niger. The screening activities occurred in the course of rainy seasons 2021 at Bengou and Tara. In 2022, one treatments' set (set-1) was evaluated at Bengou and Tara while the second set was tested at Bengou and Kalapaté. Field activities were carried out at Bengou and N'Dounga in 2023; and lastly in 2024 at the four mentioned experimental stations. Entries were laid in RCBD in three replicates regardless the year and the location. There was significant difference between tested treatments for the numbers of days to blooming in the face of their genetic level guarantying hence a selection of good nicking hybrid parents. Forty seven (47) lines including 13 with null disease incidence, 26 highly resistant, and eight resistant yielded as high as the average mean according the experiments. Although the Gam-B lines' cluster revealed the earliest in general, issued individual plants could play the role of female parents in the development of the future hybrids. Indeed, the group was the shortest in matter of plant height while presenting the maximum grain yield and inherited best resistance to the most disastrous disease of pearl millet. Moro-R offspring would be source of male parents for its overall greatest plant height. Favorable HKP-GMS descendants will be taken as female parents to cross to Moro-R side whereas approving others will be crossed onto the female Gam-B. The variety HKB, a key component in our breeding program should be improved through reciprocal recurrent selection prior to its exploitation in hybrid development.

KEYWORDS: pearl millet, hybrid breeding, lines, cluster, inbreeding, genetic admixture, standard deviation, downy mildew, disease resistance, trait, correlation.

1 INTRODUCTION

Pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br] is the next-generation crop holding the potential of nutritional richness and the climate resilience. Being a climate-resilient crop is important to minimize the adverse effects of climate change. The millet plant produces tillers at staggered developmental stages. This ability prevents the plant from complete lack of yield after an intra-cropping stress like drought. That is, when some tillers are at the vulnerable stage, others are at vegetative stage. In summary, the plant can provide reliable crop where other cereals cannot (Bidinger and Hash, 2003; Prem *et al.*, 2006; Srivastava *et al.*, 2022). Pearl millet as well has the potential to increase income and food security of farming communities in arid regions (Serba *et al.*, 2017; Satyavathi *et al.*, 2021; Yadav *et al.*, 2021; Gaoh *et al.*, 2023). Nonetheless, the Sahel Africa is currently facing an increasing food deficit problem because of insignificant yield increases of pearl millet. Indeed, breeding effort in Sahel was focused on developing OPVs mostly using mass selection, a method which is inappropriate for yield enhancement (Niangado and Ouendeba, 1987; Falconer and Mackay, 1996; Rattunde *et al.*, 1997; De Rouw, 2004; Kanfany *et al.*, 2020). It is thus crucial that productivity of this key crop is increased to ensure at least the minimal food security. Other approaches to address the yield limitation barrier should be explored. One challenge to developing the commercial potential of pearl millet is the capacity of growers to provide a consistent product that meets market standards. Pearl millet varieties with high yield and disease resistance are an integral part of meeting this challenge. According to Choudhary *et al.* (2023) hybrid development in pearl

millet is of paramount importance, especially in the context of increasing food demand and the need for climate-resilient crops. Ausiku *et al.* (2022) found pearl millet hybrid to have substantially higher water use efficiency characteristics for grain yield compared to improved varieties and landraces. It offers the promise of enhancing the yield potential, nutritional quality, resistance breeding and overall agronomic performance. Hybrid breeding is therefore one of the most effective approaches for maximizing the potential of the crop and the development of high yielding hybrids is the major target of pearl millet researchers globally (Devos *et al.*, 2006; Kapila *et al.*, 2008; Wilson *et al.*, 2008; Ambawat *et al.*, 2020). India subcontinent is an illustration where hybridization has become a focused approach of all the pearl millet breeders due to the adaptive and yield advantage of hybrids (Rakshith *et al.*, 2023). Although Africa is the top pearl millet producer in the world in terms of area occupied, farmers have not benefited from the exploitation of hybrid potential. There is no millet hybrid grown on commercial scale anywhere in Africa while a range of improved OPVs and CMS sources are available for long. The challenge is to develop hybrids for the Sub-Sahara continent (Pucher *et al.*, 2018; Sattler *et al.*, 2019; République du Niger, 2021; Sharma *et al.*, 2023; Papanna *et al.*, 2024). Being a highly cross-pollinated crop pearl millet offers huge amount of genetic variation for traits that are constitutive and responsive to multiple breeding objectives. Therefore, there is great potential to improve the cereal production through hybrid breeding. The aim of the breeder of cross-pollinated crops is to increase the amount of heterosis over the level already found in random mating populations. This can be achieved by crossing two selected genetically different populations. In this regard, INRAN in charge of agricultural research programs in Niger has developed manually 16 variety-cross hybrids from West African germplasm belonging to two putative heterotic groups. The highest yielding hybrid, Gamoji x HKB showed also the best SCA for grain yield of 163%. It was developed from parents who had high and positive GCA for grain yield. Crosses that involve two good general combiner parents should be promoted to generate the desired transgressive segregants. In contrast Moro and HKP-GMS had negative GCA for grain yield. But the cross between Moro and HKP-GMS showed high and positive SCA (155%) for this trait. For the other possible crosses, Gamoji x Moro at our knowledge is not explored so far while Gamoji x HKP-GMS and Moro x HKB showed higher and subordinate yield compared to the average mean, respectively (Srivastava, 2022; Gajjar *et al.*, 2023; Rasitha *et al.*, 2023; Rakshith *et al.*, 2023; Issaka *et al.*, 2024a). Since the amount of heterosis depends on the levels of homozygosity in the parents, the type of reproduction, and the genetic distance between the parents, its effect can be increased further if specific inbred lines are developed and crossed. Indeed, inbred lines provide maximum heterosis effects when they are fixed at loci involved in the hybrid reaction. Thus, a hybrid breeding program starts with the production of inbred lines (Melchinger *et al.*, 2007; Sattler and Haussmann, 2020). Still, for a large scale production of hybrid seed, an efficient pollination through the use of synchronous flowering parents - the pollinator should preferably flower before the female parent - will be necessary. In this regard, the direction of the cross Moro x HKP-GMS should be changed. Indeed, the female parent which is Moro flowered before the male parent HKP-GMS. The change is further of worth value because the female parent yielded less than HKP-GMS. Whereas, in seed production it is economically important to use the higher yielding parent as the female to increase the production per unit area (Andrews *et al.*, 1997; Talukdar *et al.*, 1999; Khair and Bhanvadia, 2019). Besides synchronous flowering, plant height is another important factor in the choice of hybrid parents as the height of the male parent should be greater than that of the female. Taller male parent allows for free flow of pollen across the rows and thus cuts down the seed production cost by giving better seed set, and consequently higher hybrid seed yield per unit area. This allows as well planting greater female/male ratio, which also leads to higher hybrid seed yield (Prem *et al.*, 2006; Papanna *et al.*, 2024). Else, a specific character that is usually sought in pollinators is high tillering capacity which contributes to abundant and continued pollen shed (Andrews *et al.*, 1997; Talukdar *et al.*, 1999). Otherwise, pearl millet germplasm of any genetic formula is subjected to attack from the obligate biotrophic oomycete parasite, *Sclerospora graminicola* (Sacc.) Schroet. Yet, yield stability is a major objective in breeding cultivars because in pearl millet producing areas of Asia and Africa farmers are largely dependent on the crop as their main source of staple food grain (Bollam *et al.*, 2018; République du Niger, 2020). In Africa, the initial F₁ hybrids developed from A₁ and A₂ CMS systems were completely destroyed by downy mildew and this discouraged hybrid breeding on the continent (Niangado and Ouendeba, 1987). It should be noted the 16 variety-cross hybrids developed showed a similar disease incidence with their parents, that is, the inheritance of downy mildew resistance in pearl millet is here additive. For the reason, both hybrid parents shall carry the resistant gene for the offspring to struggle against the oomycete. The objective of the current research activity was to produce inbred lines by pedigree method while identifying constructive ones to develop hybrids in the close future.

2 MATERIAL AND METHODS

Advanced lines developed from four OPVs (Table 1) belonging to two putative heterotic groups were used in this study. The eastern Niger group is characterized by ecotypes with short panicle having large diameter and includes landraces, namely Gamoji and Moro. Yet, it should be noted that Moro is of thin panicle and has further the highest content in iron and zinc among the whole germplasm. HKB and HKP-GMS belong to the western Niger heterotic group. This cluster covers genotypes with long and thin panicles. HKP-GMS is the most widely grown variety in Niger due to its large adaptation, acceptable grain yield, and short vegetative cycle, but it is afterward susceptible to downy mildew attack. In terms of head compactness, Moro is naturally the best throughout the country and may belong also to the 2nd heterotic group due to its thin panicle. On the opposite side Gamoji and HKB had the largest panicle girth and thus the loosest spikes while HKP-GMS is of intermediate caliber. The western cluster was developed through mass selection from local landraces. Gamoji was successfully converted into A₄ CMS carrier while Moro and HKP-GMS proved to encompass good number of restorer plants over the same sterility system. Among the checks, HKP of 80-85 days to maturity was obtained by pedigree mass selection from the local land race HK in 1967 following drought years. HKP-GMS was developed by ICRISAT from HKP through gridded mass selection – “GMS”.

HKP, the widest grown variety in Niger like its relative HKP-GMS, showed to be the most susceptible to mildew attack amid the country pearl millet diversity. On the contrary, SoSat-C88 with around 60 days for DFL is known for its high resistance to the disease and subsequently its good grain yielding capacity. Really, it is one of if not the highest yielding cultivar in West Africa. Original Zatib, a variety-cross hybrid is of medium maturity cycle of 90-95 days with midway behavior in matter of disease resistance.

Table 1. List of lines' parents and some of their interesting characteristics

Parents	DMI	DFL	SPL	SPD	SPN	GCA _{GY}	Hybrids	SCA _{GY}
Gamoji	7	63	43	15	60	37	Gamoji x HKB	163%
HKB	8	56	62	12	59	40		
Moro	10	57	43	11	66	-72	Moro x HKP-GMS	155%
HKP-GMS	16	60	54	12	70	-3		

Source: Issaka A., 2012

The line breeding process began in the off season of October to January 2014 and continuously run so far. Sometimes we advanced lines twice in the long off season and once during screening operation in the normal campaign. To produce inbred lines, main shoots of concerned genotypes were covered with glassine bags after exertion of the tip apex. During the evaluation in the normal season, only plants free from mildew attack are each time selected to constitute the next generation of self-fertilization. The selection of promising lines in hotspots was also based on other phenotypic traits such as the tillering propensity, the plant height, and especially the characteristics of the ear. Bagged diseased plants which were rated as healthy before were rejected at maturity. At harvest time spikes were labeled and threshed individually thereafter, and grains were dried under natural ventilation in a laboratory for the cycle to start again. Additional selection traits encompassed the grain characteristics such as its size, color, uniformity, and the quantity of seed available to cover the necessary number of trials. Once reaching the fifth generation of inbreeding in 2021, 22 lines were selected among hundreds developed for evaluation and data field record. The number and types of checks added varied according to the tests before being focused on the main appropriate ones during the most advanced assessment. Trials were implemented in Bengou (11° 58' 44, 4" N; 3° 33' 25, 6" E) and Tara (11° 90' 357" N; 3° 30' 25, 6" E) under natural disease infestation. Both experimental stations are located in the rainiest (rainfall in 2021 was 796.9 mm in 61 days and 962.4 mm in 51 days in Bengou and Tara, respectively) part of the country. Knowing the most favorable period reaction of inoculums, field assessment was conducted on July. The reason for planting at this period was seedling stage to coincide with the most regular and highest moisture time for optimal disease growth. In the following year a larger number of lines all at eighth to ninth generation of selfing were screened and the location of Kalapaté (13° 12' N & 2° 56' E) in the Sahelian agro zone was added to the list of testing environments. In the three sites, two sets of 25 lines different from one to another were assessed. One set consisting of progenies derived from the two parents involved in the cross Moro x HKP-GMS was appraised in Bengou and Tara. The second set composed of a mixture of offspring extracted from the two former varieties added to those issued from Gamoji, was evaluated in Bengou and Kalapaté. Only one check, SoSat-C88 was used during this evaluation. In 2023, 24 lines developed from Gamoji, thus considered as female lines were evaluated in Bengou and N'Dounga (11° 22' N & 2° 14' E). But trial establishment was poor in the latter environment and then discarded. Variety SOSAT-C88 was added to Gamoji, the original parent of all the Gam-B lines, as check. Finally, for the most advanced trial in 2024, thirty lines were tested in the four environments against three checks: HKP, SOSAT-C88, and Zatib. All the evaluation tests were run following the same protocol along the years. Indeed, accessions without any seed treatment were planted in a RCBD in three replications. Each plot was comprised of 20 hills arranged in two rows of 7.2 m length. Spacing between rows as well as between hills was 0.8 m. In sum the plot was 12.8 m². The trials were hand weeded and the crop grown as single plant per hill with recommended fertilization. Data were recorded on (i) days to flowering (DFL): number of days from sowing to the time at which 50% of plants within a plot flowered; (ii) plant height (PLH): height of the plant from the ground level to the spike tip in centimeter; (iii) main shoot diameter (MSD): main stem girth at half height in millimeter; (iv) spike length (SPL): interval between the tip of the spike and its bottom in centimeter; (v) spike diameter (SPD): spike girth at its middle distance in millimeter; (vi) number of spikes harvested (NSH): number of spikes per plot; (vii) grain yield (GY): grain weight per plot. Grain yield was measured as kg per plot, and then converted to kg per hectare; (viii) number of hills (NHH): number of hills harvested per plot; (ix) downy mildew incidence (DMI): number of diseased plants by the total one within the plot in percentage at 90 days after sowing. Pearl millet genotypes were classified according to Ball (1983) as (1) Highly Resistant (HR) for 0-5% disease incidence, (2) Resistant (R) for 5-10% disease incidence, (3) Moderately Resistant (MR) for 10-25% disease incidence, (4) Moderately Susceptible (MS) for 25-50% disease incidence, (5) Susceptible (S) for 50-80% disease incidence, and (6) Highly Susceptible (HS) for > 80% disease incidence. Data (ii), (iii), (iv), and (v) on entries were collected on three plants taken at random within each plot. Analysis of variance was carried out using GenStat to sort out the difference and correlation between variables.

3 RESULTS

3.1 CORRELATION BETWEEN VARIABLES

Although the tested entries varied from one experiment to another, there was a positive connection generally highly significant between NHH and NSH not considering the self-fertilization level. We had the same kind of association between MSD and SPD. But here the relationship was becoming more significant with increased cycles of inbreeding. Similarly, PLH was positively and sometimes significantly coupled to SPL. NSH was usually positively and highly correlated with PLH while it showed the preeminent positive correlation with GY. This link was also the highest in terms of significance, followed by that between GY and plant height. Yet, the relationship between GY and MSD as well as that between NSH and MSD was highly significant and negative in the first selfing cycles whereas it became positive with increased inbreeding. GY and PLH were always negatively correlated with DFL at significant level. The association between SPL and DFL was in general negative as well. Moreover it was weak and non significant. DFL was positively associated with MSD. This association of high level of significance became lower with advanced generations. Through all the five case studies DMI was positively and weakly linked four times to GY, NSH, and SPL against one negative correlation, three times to NHH, twice to MSD and PLH, and lastly once to SPD and DFL. The overall computation gave DMI lowly and inconsistently connected to the leftover parameters whereas most of connections were not significant.

Table 2. Correlation between variables for the different sets of entries along four years

DFL	HKB/HKP-GMS/Moro-R in 2021								
DMI	-0.19 ^{ns}								
GY	-0.52**	0.06 ^{ns}							
MSD	0.60****	-0.34 ^{ns}	-0.70****						
NHH	-0.53**	0.13 ^{ns}	0.81****	-0.50**					
NSH	-0.58***	0.10 ^{ns}	0.92****	-0.67****	0.91****				
PLH	-0.26 ^{ns}	0.23 ^{ns}	0.26 ^{ns}	-0.38 ^{ns}	0.00 ^{ns}	0.19 ^{ns}			
SPD	0.02 ^{ns}	-0.29 ^{ns}	0.11 ^{ns}	0.23 ^{ns}	0.29 ^{ns}	0.10 ^{ns}	-0.77****		
SPL	-0.38 ^{ns}	0.55***	0.10 ^{ns}	-0.34 ^{ns}	0.12 ^{ns}	0.13 ^{ns}	0.55***	-0.41*	
DMI	0.29 ^{ns}								Set-1: Moro-R/HKP-GMS in 2022
GY	-0.65****	-0.13 ^{ns}							
MSD	0.68****	0.46*	-0.41*						
NHH	-0.35 ^{ns}	-0.12 ^{ns}	0.44*	-0.39*					
NSH	-0.59****	-0.28 ^{ns}	0.75****	-0.54***	0.77****				
PLH	-0.55***	-0.10 ^{ns}	0.79****	-0.38*	0.15 ^{ns}	0.49**			
SPD	0.25 ^{ns}	-0.14 ^{ns}	-0.25 ^{ns}	0.31 ^{ns}	0.06 ^{ns}	-0.13 ^{ns}	-0.31 ^{ns}		
SPL	-0.06 ^{ns}	-0.15 ^{ns}	0.03 ^{ns}	-0.01 ^{ns}	-0.35 ^{ns}	-0.21 ^{ns}	0.25 ^{ns}	-0.45*	
DMI	-0.03 ^{ns}								Set-2: Gam-B/Moro-R/HKP-GMS in 2022
GY	-0.41*	0.12 ^{ns}							
MSD	0.14 ^{ns}	-0.09 ^{ns}	-0.20 ^{ns}						
NHH	-0.30 ^{ns}	0.06 ^{ns}	0.33 ^{ns}	-0.44*					
NSH	-0.23 ^{ns}	0.15 ^{ns}	0.20 ^{ns}	-0.30 ^{ns}	0.38*				
PLH	-0.24 ^{ns}	-0.11 ^{ns}	0.36 ^{ns}	0.10 ^{ns}	0.06 ^{ns}	-0.11 ^{ns}			
SPD	0.09 ^{ns}	0.20 ^{ns}	0.06 ^{ns}	0.07 ^{ns}	-0.17 ^{ns}	-0.32 ^{ns}	0.36 ^{ns}		
SPL	-0.07 ^{ns}	0.07 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.16 ^{ns}	-0.38*	0.34 ^{ns}	-0.06 ^{ns}	-0.43*	
DMI	-0.36**								Gam-B-37-30/Gam-B-11-1-14 in 2023
GY	-0.54****	0.09 ^{ns}							
MSD	0.22 ^{ns}	-0.27 ^{ns}	0.19 ^{ns}						
NHH	-0.53****	0.27 ^{ns}	0.60****	-0.24 ^{ns}					
NSH	-0.60****	0.30*	0.80****	0.02 ^{ns}	0.67****				
PLH	-0.50****	0.15 ^{ns}	0.63****	-0.22 ^{ns}	0.59****	0.43***			
SPD	0.34*	-0.10 ^{ns}	-0.01 ^{ns}	0.40***	0.02 ^{ns}	0.02 ^{ns}	-0.42***		
SPL	-0.08 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.18 ^{ns}	0.31*	-0.02 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.34*	-0.44***	
DMI	-0.08 ^{ns}								Gam-B/HKP-GMS/Moro-R in 2024
GY	-0.39****	0.02 ^{ns}							
MSD	0.15 ^{ns}	0.19*	0.18*						
NHH	-0.24**	-0.31****	0.35****	-0.46****					
NSH	-0.48****	0.13 ^{ns}	0.79****	0.15 ^{ns}	0.35****				
PLH	-0.28****	-0.16 ^{ns}	0.49****	-0.02 ^{ns}	0.27***	0.30****			
SPD	0.09 ^{ns}	-0.04 ^{ns}	0.30****	0.44****	-0.15 ^{ns}	0.15 ^{ns}	0.09 ^{ns}		
SPL	0.00 ^{ns}	0.04 ^{ns}	-0.09 ^{ns}	0.32****	-0.06 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.05 ^{ns}	-0.39****	
	DFL	DMI	GY	MSD	NHH	NSH	PLH	SPD	SPL

3.2 ANOVA OF VARIABLES

Because of highly significant correlation between NHH and NSH we dropped the variable NHH during the analysis of variance. For the first trials run in 2021, HKB lines group had the highest DMI of 25%, which is more than the double of the average mean (table 3). Consequently it illustrated one of the lowest grain yields in the middle of varietal bunches, even confirming its longest spike. Furthermore, the four HKB lines were significantly different only for two variables against the total of eight registered. Otherwise, three lines attested good resistance with a null disease incidence amongst Gam-B-37-30-2-5-2 presenting the top grain yield amid the whole entries. It had also together with the local variety the best tillering capacity. On the whole, the female Gam-B cluster recorded the peak tillering ability and the maximum grain yield. Talking about PLH, it was shorter than possible corresponding males of any other genotypes' group whereas it was of the earliest flowering.

Table 3. Mean performance of pearl millet genotypes for 8 traits across sites over 2021 to 2024

Year	Cluster	DMI	DFL	PLH	MSD	SPL	SPD	NSH	GY
2021	Gam-B	7*	61*	183*****	13*****	46 ^{ns}	32*****	44 ^{ns}	779*****
	HKB	25 ^{ns}	62 ^{ns}	212 ^{ns}	14 ^{ns}	56 ^{ns}	26*****	34 ^{ns}	452*
	HKP-GMS	6 ^{ns}	65**	214*****	14 ^{ns}	48*****	26 ^{ns}	26*****	393*****
	Moro-R	3**	64 ^{ns}	230 ^{ns}	14 ^{ns}	49 ^{ns}	23*	40 ^{ns}	646 ^{ns}
	Checks	13 ^{ns}	61 ^{ns}	234 ^{ns}	13 ^{ns}	55 ^{ns}	25 ^{ns}	55 ^{ns}	1124 ^{ns}
	Average	10*****	63*****	211*****	14*****	50*****	27*****	35*****	588*****
2022	Moro-R	2 ^{ns}	66 ^{ns}	221 ^{ns}	16 ^{ns}	43 ^{ns}	26 ^{ns}	42 ^{ns}	725 ^{ns}
	HKP-GMS	2 ^{ns}	68 ^{ns}	220 ^{ns}	16 ^{ns}	44 ^{ns}	26 ^{ns}	38 ^{ns}	684 ^{ns}
	Check	3	62	227	15	37	26	44	659
	Average	2^{ns}	67^{ns}	221^{ns}	16^{ns}	43^{ns}	26^{ns}	40^{ns}	704^{ns}
	Gam-B	3 ^{ns}	66**	224 ^{ns}	14 ^{ns}	43*****	25*****	46 ^{ns}	763 ^{ns}
	Moro-R	6*	66*	227 ^{ns}	14 ^{ns}	48*	24***	42 ^{ns}	735 ^{ns}
2023	HKP-GMS	6 ^{ns}	68 ^{ns}	209 ^{ns}	14 ^{ns}	38 ^{ns}	25 ^{ns}	41 ^{ns}	612 ^{ns}
	Check	5	59	252	14	40	27	50	1058
	Average	4**	66*****	225^{ns}	14*	48^{ns}	24*****	44^{ns}	754^{ns}
	Gam-37-30-2	1 ^{ns}	72*****	174*****	15*	44*	33*****	49*****	766*****
	Gam-11-1-14	1****	68*****	196*****	14 ^{ns}	50*****	28*****	57*****	1050 ^{ns}
	Checks	1 ^{ns}	59 ^{ns}	232 ^{ns}	13 ^{ns}	36 ^{ns}	29 ^{ns}	75 ^{ns}	1540*
2024	Average	1***	70*****	187*****	15***	46*****	31*****	53*****	922*****
	Gam-B	4 ^{ns}	67*	191*	12 ^{ns}	49*****	19 ^{ns}	27*	551 ^{ns}
	HKP-GMS	6 ^{ns}	71 ^{ns}	228 ^{ns}	14 ^{ns}	49 ^{ns}	23***	29**	737**
	Moro-R	6***	69*	204***	14 ^{ns}	50*****	24*****	28*****	653*****
	Checks	7 ^{ns}	66 ^{ns}	215 ^{ns}	14 ^{ns}	45*****	25***	36 ^{ns}	842 ^{ns}
	Average	6****	68*****	206*****	14^{ns}	49*****	24*****	29*****	666*****

ns = non significant; * significant at 0.05; ** significant at 0.01; *** significant at 0.005; **** significant at 0.001 ***** significant at <0.001

According to Student-Newman-Keuls test at the 5% level, a larger sub-cluster of HKP-GMS – nine lines next to the total of eleven – thus at fifth generation of selfing and even being issued from different S₄ parents recorded together a lower amount of hills harvested, direr tillering capability, and consequently the poorest grain yield. Among the two leftover genotypes HKP-GMS-128-1-196-1-1 with long spike, high tillering ability, and subsequently good grain yield revealed promising. Nonetheless it should undergo self-fertilization process to better enhance its resistance to downy mildew. Else the difference relating lines was significant, particularly in matter of DFL, PLH, and GY inside Gam-B and HKP-GMS offspring giving thus a large choice in selecting hybrid parental material. The distance between the two most remote lines contained by cluster or the standard deviation was of (64-58) = 6, and (70-62) = 8 points for the Gam-B and HKP-GMS in that order. Whilst Gam-B is considered as female part for future hybrid development it flowered three and four days before the supposed male blocks Moro-R and HKP-GMS (table 3), respectively. The complex Moro-R was one day earlier than HKP-GMS and confirmed its thinnest spike diameter where Gam-B proved its largest one.

The HKB cluster was useless because of its lack of performance in 2021, so not considered for the 2022 research work. For the set-1 of genetic material evaluated in 2022 six lines: Moro-R-68-17-2-9-3-1, Moro-R-68-17-2-9-1-23-3, Moro-R-68-17-2-9-1-23-4, HKP-GMS-128-1-31-2-3-1, HKP-GMS-128-1-196-1-1-6 and HKP-GMS-128-1-196-4-27-1 were evidence for good grain yield and null disease incidence. In sum the mean disease incidence was smaller than that of the resistant check. What was very specific for the set-1 was lines were not different from each other within and between the two genotypes' groups for any of the eight traits. Although HKP-GMS issued

lines were all of S₆ class, the Moro-R division was a mixture of S₆ and S₇ lines, but in both patterns the whole material attained similar genetic standing at the same time. Furthermore, some genotypes inside clusters were derived from different relatives. The standard deviation for DFL inside lines' groups was superior to that between groups. Moro-R and HKP-GMS were very similar for all the traits with the former group being slightly earlier.

Whilst the HKP-GMS faction going towards inbreeding depression was also excluded, two derivatives from the highly resistant HKP-GMS-R-128-1-14-2-1 were included for the 2022 trial set-1. Any statistical difference for any variable was recorded between the two lines of the seven generation of self-fertilization. The Gam-B group was enlarged with a different sub-group. Checks taken apart, the Gam-B lines kept a merely advantage of better tillering capacity and as result that of grain yield (table 3). For the essential, entries were significantly different within Gam-B and Moro-R clusters for DFL and SPD. Therefore, many Moro-R lines could be used to cross with the Gam-B germplasm. Indeed, while displaying the same DFL average mean of 66 days, Moro-R and Gam-B sets recorded a within standard deviation of ten and nine days, respectively. Here also, the variability intra-cluster was thus higher than that between clusters concerning the DFL parameter. Additionally, crosses become naturally possible between individual plants of HKP-GMS and Moro-R in one side and amid Gam-B and HKP-GMS in another side because of lower intergroup standard deviations. Really the male parental material Moro-R was slightly earlier and taller than the female one, but the future pollinator HKP-GMS was shorter than its corresponding female Gam-B. So, dwarfing gene should be backcrossed in the female background for large scale hybrid exploitation. There was no significant difference for the variables NSH and GY, may be due to the fact that spikes counting and threshing operations were made manually. Actually the related coefficients of variation were high. One female line Gam-B-37-30-2-5-8-1-2 was added to the list of genotypes with null downy mildew incidence.

In 2023, trials were implemented mainly to check whether the disease resistance of the female parent was improved and differences between the two Gam-B sub-groups exist. Lines were highly different inside clusters in regard to five traits amid the eight recorded. Nine genotypes: Gam-B-37-30-2-5-8-1-1-1, Gam-B-37-30-2-5-8-1-3-3, Gam-B-37-30-2-5-8-1-3-6, Gam-B-37-30-2-5-7B-1-4-2, Gam-B-11-1-14-32-12-1-3-6, Gam-B-11-1-14-32-12-1-2-1, Gam-B-11-1-14-32-12-1-2-4, Gam-B-11-1-14-32-4-1-1-3, and Gam-B-11-1-14-32-4-1-1-5 showed null disease incidence and three from the band were not significantly different from the known high yielding SoSat-C88 in matter of GY. At comparable values of DMI, DFL, and NSH the sub-group with the longer spike and thinner stem produce better grain yield. Again this demonstrated the positive correlation connecting grain yield and spike length observed in almost all experiment cases. The DFL variable recorded the highest standard deviation of 23 and 28 for the sub-group Gam-B-11-1-14 and Gam-B-37-30 correspondingly, compared to only four points involving the two progenies' sub-groups.

Concerning the last and most advanced trial, the Moro-R cluster showed the highest variability. It flowered two days after and before Gam-B and HKP-GMS, respectively. Except for MSD the variability inter-cluster was in general highly significant. Apart from the Gam-B and the checks ensembles, lines were significantly different within and between clusters in view of the most important trait in breeding staple cereals that is the grain yield. The inside standard deviation of DFL varied from three points, eight to 13 for HKP-GMS, Gam-B, and Moro-R clusters, respectively.

In general, the group Gam-B showed the lowest value in terms of DMI and PLH, but the highest value of GY. These qualifications constitute a strong proof of the female status that can play Gamoji's offspring. Nonetheless, the Gam-B formula had generally the earliest vegetative cycle what may hinder its role of female since in normal hybrid production the female parent should be the late flowering component indoor the couple. Still, the DFL parameter was enlarged within groups through inbreeding generations making crosses more feasible between groups or at least between individual plants of counterpart clusters. Also, the genetic material developed in the course of the research activities revealed added resistance. Twenty-two parental lines and their derivates showed a null disease incidence, but these entries were not necessary the best in matter of grain yield. All told, 64 lines of the total germplasm evaluated amongst nine with null disease incidence, 42 highly resistant and thus 13 resistant; had lower grain yield against the mean average. Fortunately 47 others yielded as high as the average mean according the experiments. These include 13 accessions which were never present of downy mildew, 26 highly resistant genotypes, and eight lines with disease incidence < 10%. Four lines: N°1 Gam-B-37-30-1-2-1; N°43 Moro-R-68-17-2-1-5-1-3; N°44 Moro-R-68-17-2-1-5-1-4; and N°131 Moro-R-68-17-2-1-5-1-1-1-27 even though moderately resistant demonstrated acceptable grain yields above the average mean. The check cluster showed the lowest value of DFL during the whole field evaluation whilst this parameter was more dynamic with line clusters under breeding procedure (table 3). MSD was the variable with a reduction of significant differences.

4 DISCUSSIONS

4.1 CORRELATION BETWEEN VARIABLES

Before starting breeding, knowledge of association among traits enables the breeders in deciding a suitable selection criterion for simultaneous genetic improvement of complex and associated traits. Grain yield was positively and significantly correlated with the number of harvested hills as well as the number of harvested spikes per plot as reported by Pucher *et al.* (2016). That is, genotypes with higher tillering capacity would be more productive. It means also grain yield could be improved by increased plant density, one reason to breed for hybrid pearl millet to cope with the growing population. In fact, OPVs do not tolerate higher plant density due to elevated

interplant competition (Fasoula and Fasoula, 2002). On the contrary GY was always negatively correlated with DFL at a significant point, meaning high grain yield is related to early flowering. Similar results were reported by Serba *et al.* (2020) in contrast with the findings by Kumar *et al.* (2021). Plant height was positively and significantly linked to spike length in accord with the findings of Pucher *et al.* (2016), whom revealed SPL was sequentially also highly significantly correlated to number of grains per panicle. Nonetheless, the link between GY and the latter trait was not significant. But it was according to Serba *et al.* (2020). Still, the link between PLH and SPD was negative and significant denoting that plants with larger panicle diameter are shorter, thus favorable to be female parents. Issaka *et al.* (2024a) reported that the shortest traditional variety in Niger, namely Ankoutess had spikes with the lowest length and largest girth values amid the whole country millet diversity. So, in hybrid breeding one should be tempted to convert into CMS carrier those plants which are naturally shorter for a good hybrid seed set when crossed to taller male plants. According to Papanna *et al.* (2024) B-lines are commonly bred for shorter height (<100 cm) and larger seed size, lodging resistance, good exertion and seed set, and compact panicles. DFL was positively and significantly associated with MSD which in turn was positively connected to SPD in all the cases study. Then, plants with large panicle girth are actually supposed to be the later flowering, another argument supporting again the female nature of those genotypes because in hybrid breeding the female should flower after the male parent. Still, Ankoutess with the largest spike girth, but having the thinnest MSD in Niger pertains to the earliest flowering material. The remark here is that with Ankoutess MSD and SPD are specifically inversely connected. Conversely, taller plants and thus bearing long panicles are supposed to play the role of the male parent in breeding hybrid cultivar. This is reinforced by the fact that SPD was negatively and significantly correlated with the SPL which was positively and significantly linked to PLH. It is desirable to breed pollinators of 150–180 cm in height, but no shorter than the A-line with built-in attributes that will be preferred by farmers in the hybrids (Rasitha *et al.*, 2023; Papanna *et al.*, 2024). Again positive correlation between MSD and SPD suggests certainly the male plants in pearl millet were of thin stem and panicle girth while female at the opposed side should have larger stem girth to support the hybrid seed. The relationship was becoming more significant with increased cycles of inbreeding due to unambiguous segregation of spikes towards the two types. Co-segregation of genes controlling characteristics expression might be the basis of inter-trait correlation in a positive direction. Hence, the correlation analysis suggested that by careful selection of parental alleles controlling increasing or decreasing combinations of character, one can improve the traits simultaneously (Kumar *et al.*, 2021).

NSH was all in all positively and highly correlated with PLH, the latter trait in turn positively and sometimes significantly linked to SPL would refer to the superior capacity of male parental material to develop more tillers. According to Prem *et al.* (2006) a specific character that is usually sought in pollinators is high tillering capacity which contributes to profuse production of pollen. It seems likely that abundant pollen production in hybrids will confer some protection from ergot and smut infection (Andrews *et al.*, 1997). The relationship between GY and MSD like that between NSH and MSD was highly significant and negative in the first selfing cycles whereas it became positive with increased inbreeding. Like mentioned earlier the increased GY would arise from an increased proportion of plants with high tillering ability along the self-fertilization process, plants which are in reality the male part. Genotypes of high tillering ability showed in general thin stem diameter – NSH was negatively and highly correlated with MSD – one of the reasons why the association between DFL and MSD, initially of high level of significance may become lower with advanced generations. Additionally, the positive correlation between MSD and SPD meant thin spikes are longer and hence supporting improved grain yield. According to De Rouw (2004) grain yield in pearl millet is primarily a function of grain or panicle number per unit area. Long panicle containing as many as fertile florets ending up in large seed numbers, were preferred by farmers in the Sahel zone of Africa (Bidingier and Hash, 2003; Omanyia *et al.*, 2007; Drabo *et al.*, 2019; Kanfani *et al.*, 2020; Bassirou *et al.*, 2023). In different words, GY being a necessary character in cereal improvement, breeders have tendency to primary select for traits like profuse tillering ability, panicle compactness both precursors of higher grain yield. Spike girth is definitively determined by the length of the peduncle of the spikelet. More this peduncle is longer, more the spike girth is enlarged giving loose panicle. In contrast, thin spikes result from spikelets developed on short peduncles. This may lead to head compactness equivalent to increased grain yield supported by the greater number of grains per panicle (Pucher *et al.*, 2016; Serba *et al.*, 2020; Kumar *et al.*, 2021; Issaka *et al.*, 2024a). Really, we observed a general trend to compactness of even the spikes of larger diameter following the advancement of lines under directional selection.

Downy mildew is the most important disease of pearl millet in Africa and Asia. This requires the use of sources of resistance in the breeding material. DMI was lowly and inconsistently connected with the eight other agronomic traits in the current study. Its sign changed from one experiment to another for same variables, and most of the correlations were not significant. For illustration it was positively correlated to GY as well as to its principal components like NSH and SPL four times over the total five of experiment cases. Whereas, downy mildew is the most disastrous disease of pearl millet, how can one approve a positive correlation between the disease incidence and the cereal production? According to Prakash *et al.* (2014), the inheritance of downy mildew resistance in pearl millet is highly variable and inconsistent. This could be attributed to a lack of homozygous resistant/susceptible genotypes, a lack of genetically pure pathogen isolate, and variable environmental conditions. According to Raj *et al.* (2018), the complexity in the inheritance of the disease resistance may be due to the out-crossing nature of both the pathogen and the cereal host. Also, it was negatively connected to DFL for four cases among the total five. That is, late flowering was associated with relatively lower downy mildew susceptibility in agreement with the findings of Pucher *et al.* (2016). Hence, with increased generation of selfing synonymous of augmented DFL value, appeared more genotypes with enlarged disease resistance. Twenty-two parental lines and their derivatives showed a null disease incidence while out of the HKB cluster, the whole tested germplasm proved resistant with a disease incidence < 10%. So, even though

the determinism of genetic control to the oomycete is generally under additive gene effects (Issaka *et al.*, 2024b) what implies two resistant parents will be necessary for the hybrid to prosper adjacent to the oomycete, the entire diversity developed would be valuable in consequence. Nonetheless, the most resistant hybrid may be produced by crossing two lines with the highest general combining ability for the resistance (Ouendeba *et al.*, 1993; Rasitha *et al.*, 2023; Papanna *et al.*, 2024). Among the fresh material, Gamoji derivatives beyond demonstrating the inherited GCA for GY and resistance to the fungus auxiliary supported by the lowest DFL would represent a key female part for building pearl millet hybrids. But, it should be noted that some few lines even revealing adequate grain yield were moderately resistant and therefore should probably undergo additional selfing cycles to align with the disease. For the same reason even some resistant ones particularly those showing high grain yield should go forward generations of selfing to update the resistance level as well as the yielding capacity.

4.2 ANOVA OF VARIABLES

HKB which complete designation is Haini Kirey of Bengou is a local variety constantly cultivated in the area. Even though, it was reported as resistant cultivar and this even from trials' results recorded at Bengou (Wilson *et al.*, 2008; Issaka *et al.*, 2024b). Nonetheless, its offspring showed a high disease incidence out of loose panicles, after five generations of selfing each coupled with selection of only resistant plants. Determinism of the resistance to the oomycete may be controlled by additive gene effect. In fact, studying the resistance of pearl millet to four isolates collected in Niger, Issaka *et al.* (2024b) found the genetic control of the resistance to the isolate of Tara, a village close to that of Bengou was under additive gene action. This is the reason why isolated lines became so susceptible compared to their original parent. Thus, a performing OPV does not necessary yield good offspring, and therefore shall not be considered based on its performance *per se*. Still, among the genetic material tested, HKB cluster had being the tallest and one of the earliest genotypes could be considered as pollinator in future breeding work. This role was reinforced by the fact that it had the best spike length too. Indeed, the correlation between spike length and GY was positive from our study. Moreover long spikes were preferred by Sahelian pearl millet growers wherever the commerce and transport were based on bundles (Bezançon *et al.*, 2001; Buerkert *et al.*, 2001; Omanyia *et al.*, 2007; Drabo *et al.*, 2019). Therefore, HKB derivatives could be used in breeding program whenever the spike length constitutes a desirable trait. Furthermore, the wild variety registered good GCA for 6 agronomic parameters over 7 measured (Issaka *et al.*, 2024a). Although, the genetic treasure HKB may be, it should be noted that resistance to downy mildew is a prerequisite in breeding pearl millet hybrid parents. Yet, one option to get benefit from the HKB genotypes in the future would be to test the material in more environments as the disease could vary from one locality to another (Issaka *et al.*, 2024b). HKB was developed by mass selection, a method expected to be more effective for qualitative traits such as plant height, panicle length, and seed mass. However, mass selection technique is less efficient for low heritable traits and another option is to improve the original population, for instance via recurrent selection. This method has proven very effective as a result of concentrating favorable genes ending up in increased mean of the population and superior performance of the best families for the target attribute. It could by the way boost the valuable use of non-elite source materials, where the greater opportunities for recombination could break linkages between genes for the desired trait and unfavorable agronomic characteristics. Moreover, through its tandem cycling of selection and recombination, recurrent selection is a means particularly useful for improvement of polygenic traits at once of several qualitative others like disease resistance (Rattunde and Witcomb, 1993; Weltzien *et al.*, 1995; Rattunde *et al.*, 1997; Weltzien *et al.*, 2020). It would be therefore a proper approach of upgrading varieties like HKB that already showed good GCA for quantitative traits akin to grain yield. For breeding programs emphasizing the development of inbred lines and hybrids from populations derived from distinct heterotic groups, reciprocal recurrent selection for a few cycles is suggested to help derive superior heterotic inbred lines. To do so, the population from one heterotic pool will serve as a tester for the population from the other heterotic pool to improve the GCA and SCA of both the populations in different heterotic pools. Thus, HKB could specifically be subjected to recurrent selection to improve the frequency of restorer genes in the male parent for the definite CMS system (Patil *et al.*, 2021; Papanna *et al.*, 2024).

An HKP-GMS series showed a general reduction of NHH and consequently of NSH which outcome was a lesser grain production. NSH underlying the number of tillers per hectare had presently the highest positive and significant correlation with grain yield. Because high grain yield and its stability is the top priority in breeding pearl millet in the arid zones of Asia and Africa, the HKP-GMS faction that showed weak NSH value revealed then useless (Bidingier and Hash, 2003; Ambawat *et al.*, 2020; Weltzien *et al.*, 2020). But two elements of the ensemble that are HKP-GMS-128-1-14-2-1 and HKP-GMS-128-1-196-1-1 of comparable seedling establishment level showed better tillering propensity. The high significance observed between entries for most variables inside HKP-GMS block in 2021 would arise simply from the partition in the two contrasting classes of low potential and promising genotypes. It was not a matter of poor germination, but lines extracted from the same genotype would reach inbreeding depression at different generations of selfing. Indeed, in out crossing cereals like pearl millet, stigmata inside one spike are usually pollinated by different male gametes of diverse genetic level, or more precisely of different DFL values. According to Khair and Bhanvadia (2019) pearl millet florets stigmas emerge first and anthers appear 3–4 days later. Practically, most of the standard deviation values obtained stuck between one to four days inside clusters and along all experiments, the same span time for all stigmata of a given ear to come out day by day and to be available for cross-fertilization.

Yet, the two Gam-B groups evaluated in 2023 scored the premier intra-cluster standard deviation of above 20 days followed by Moro-R from the final experiment. This result pointed at the landrace nature of both Gamoji and Moro characterized by huge genetic load. The important genetic mixture was difficult to be fully uncovered even after numbers of inbreeding generations. For instance, the Gam-B

lines while being at higher level of self-fertilization (S_8 to S_9) were very much different in regard to six to seven traits amid the eight recorded. Moro-R S_6 to S_{11} descendants concerning the 2024 trial were significantly different about seven variables over eight. Pucher *et al.* (2016) and Sattler *et al.* (2019) reported that high levels of genetic admixture in West African naturally occurring populations or released OPVs as the cause for failure to identify heterotic pools. The lack of differentiation into distant genetic clusters among such populations was probably due to the high out crossing nature of pearl millet leading to the concomitant high rate of pollen-mediated gene flow within the region. One may think that DFL is governed by polygene, and it is thus a vast quantitative trait. Its average mean was even more variable than that of the grain yield supposed to be the most quantitative of the parameters under the study. According to Mendelian laws more the number of genes controlling a trait are important more the trait requires extra generations of self-fertilization to reach homozygous status. But things should be viewed differently. For extreme deviations noted up, one plant's offspring may come from different tillers of diverse stages. In pearl millet, the first tiller generally appears in the axial of the third leaf nearly 12 days after seedling emergence. Subsequent primary tillers continue to develop alternatively at approximately every three days. Secondary tillers are produced from primaries at a similar rate, resulting in a potentially very large number of tillers, all at different phases of development (Bidinger and Hash, 2003). Furthermore, some varieties like Gamoji has another type of branching tillers which appear in the upper level, source of second to third harvest to occur. Such circumstances are very convenient for millet accessions of even different maturing group to cross-fertilize each others because of synchronous flowering with specific tillers of the corresponding parents.

Although pearl millet is a highly cross pollinated crop, the amount of heterozygosis observed within some clusters was not significant for variable characters. This may be due to the moving forward to homogeneous or even homozygous nature of the measured traits, acquired after several generations of directional selection and selfing. In regard to the experiment set-1 implemented in 2022, both Moro-R and HKP-GMS clusters comprised of S_6 lines reached same genetic standing at once in spite of the variables. Whereas, another Moro-R group comprised of lines of higher inbreeding level demonstrated larger heterozygosis for seven traits out of the eight of concern in 2024. In general, the presence of significant phenotypic differences particularly for DFL and secondary for grain yield between the tested entries suggested the existence of sufficient phenotypic and genetic variation in the experimental material for selection.

Definitively lines were significantly dissimilar in matter of DFL between and inside offspring's groups in spite of the self-fertilization cycles. Except for small subsets of Moro-R, HKB, and HKP-GMS related to 2021 and 2024 testing; the standard deviation intra-cluster was always higher to the inter-cluster. But similar sample of no more than 2 HKP-GMS lines in 2022 illustrated may be a hazardous standard deviation for DFL greater than that observed between the corresponding clusters. For large scale production of hybrid seed efficient pollination method will be necessary. The use of synchronous flowering parents was made possible through the larger inside standard deviations obtained and sustained by the weaker inter-clusters DFL differences, in agreement with Bidinger and Hash (2003), and Serba *et al.* (2017). Thus, Moro-R could play the role of pollinators against both HKP-GMS and Gam-B. Indeed, in addition to its thinnest spikes it revealed being taller than both female progenies, another important factor in the choice of hybrid parents. In opposition and at overall the Gam-B group with the highest grain yield, the best inherited GCA for resistance to downy mildew, the largest panicle girth, and the shortest plant height may confirm really its great role of female parent (Prem *et al.*, 2006; Papanna *et al.*, 2024; Issaka *et al.*, 2024a). What's more and though, the mean grain yield recorded by the three different clusters was almost similar from one experiment to another, the Gam-B families were slightly better in general. In seed production it is economically important to use the higher yielding parent as the female to increase the production per unit area (Andrews *et al.*, 1997; Talukdar *et al.*, 1999). Indeed, the high grain yield potential of A-lines, both as lines per se as well as in combining ability is still the most important consideration. GCA is heritable from one progeny to another and A-lines with high GCA for grain yield confer stability of hybrid production over more diverse environments (Hanna and Rai, 1999; Issaka *et al.*, 2024a). High general combiners are likely or even more likely to occur in lines with average to high grain yield per se. Selecting high GCA lines in high-yielding lines increases the profitability of seed production. The selected lines can then be evaluated for GCA and SCA at the later stages. Hybrid per se performance can be predicted based on parental GCA, which is attributable to additive gene effects (Falconer and Mackay, 1996). As a result, the GCA of parents can be used as a predictive tool for developing hybrids with superior per se, reducing the use of input resources and increasing breeding efficiency. Thus, the restorers should also be highly productive from the viewpoint of the seed production economy. According to Gajjar *et al.* (2023) there was high degree of correspondence between *per se* performance and SCA effects of hybrids as well as estimates of heterosis.

Being the tallest genotype, the earliest individual Moro-R plants could be involved in developing early flowering and high yielding hybrids which could escape terminal drought very frequent in Sahel. As reminder, GY was always negatively correlated with DFL at a significant level, meaning that high grain yield is related to early flowering. According to Bidinger and Hash (2003), early genotypes that flowered 20 days before the onset of a terminal drought stress had four-fold lower yield reduction than later-flowering genotypes that flowered only ten days before the onset of such stress. Else, the direction of the variety-cross hybrid Moro x HKP-GMS manually made should change with regard to the future exploitation of CMS hybrids. Even though the two parents showed comparable grain yield with minor advantage for Moro-R, this adjustment would be of worth value because the conversion of Moro edifice into stable A_4 CMS carrier was not successful. But this was at population level and things may change when dealing now with advanced lines. Really it will be plausible to exploit from now the cross in both directions.

Coming again to the variable DFL, it got increased with recurrent inbreeding in the present study. Really, in the course of selfing process lines become weaker, a reason why the checks previously of similar DFL with the lines parental material, revealed earlier in any trialing case thereafter. However, DFL was negatively correlated with grain yield, the most significant objective in breeding pearl millet. Still, crossing between distant inbred lines can result in an early offspring because of the heterosis effect which can be controlled by epistatic effect for days to blooming trait. Shull (1908) observed in maize as result of self-fertilization, a reduction or a deterioration of plant vigor succeeding a physiological infirmity, competitive weakness, and susceptibility to disease. Still, early establishment of leaf area sufficient to intercept a majority of the incoming radiation is essential for producing a large crop biomass. Total biomass productivity in pearl millet, as in any crop, is a product of growth rate and growth duration (Bidingier and Hash, 2003; Srivastava *et al.*, 2020). Yet, the maize plant vigor was restored by crossing and heterosis can manifest by virtue of improvement of several traits during plant growth and development. In pearl millet, considerable growth differences between hybrids and their parents was observed during different stages of growth and development (Srivastava *et al.*, 2020).

5 CONCLUSIONS AND PERSPECTIVES

Self-fertilization followed by selection is really one of the best ways to discover previously hidden genetic combinations and get rid of those are undesirable. One of the great results was the obtaining of lines completely free of mildew during this research activity. Indeed, the absence of resistant parents was the first blocking point in the development of millet hybrids in Niger. A step has therefore been taken with the advent of these new genotypes. Another key result was the method also allowed a segregation of populations into lines sometimes very distant in terms of flowering date. This makes the choice of synchronous parents for the production of hybrids more flexible, unlike with OPVs where the flowering date is fixed. Working with several varieties also increases the chance in the qualitative choice of future parents who will produce good hybrid vigor. One of the most significant breeding objectives for pearl millet is to develop lines with higher grain yield. Certain lines showed a grain yield close to that of the check SOSAT-C88, one of the best pearl millet varieties if not the best in terms of productivity on the African continent. It is therefore the fundamental trait and any genotype is only really valid in view of the contribution it can make in building the grain yield. For the reason, some genotypes though reaching plausible stability level and even being resistant may not be challenging for hybrid development because of their low grain yield. On the contrary, some corresponding lines that are close to homozygosity with traits of interest can be utilized in breeding program straightaway as parents for hybrid production or may be used in the line development programs. Nevertheless, the use of molecular markers would be of worth value to better decode the lines' genetic purity and to know exactly which germplasm is fixed and thus to be ready for use. Other lines of interest and showing a disease incidence close to null should be pushed to next generation of inbreeding. The crop productivity was positively associated with the tillering capacity, the number of hills harvested, and the length and diameter of the ear. The association is even greater with the tillering capacity and the number of hills harvested. This last trait would mean that crop productivity could be improved by adjusting population density. On the contrary, the date of 50% flowering and the incidence of downy mildew illustrated the highest values in terms of negative correlation with the grain yield. Genetic admixture may be the cause of low heterosis with crosses like Gamoji x HKP-GMS between heterotic parents for both spike length and its girth. With the now available constructive lines such crosses could be reinvestigated to check whether improved grain yield can be. Gamoji and Moro as well pertained to two heterotic groups according only the panicle girth. It was not the general case through the current results, but it was evident when considering various individual and nicking lines. Then, it's time to explore such cross. On the whole, the role of Gam-B cluster as female parent was strengthened by its highest grain yield and resistance to downy mildew inherited from the original parent. Additional favorable traits encompass its lowest PLH standard supplemented by divergent DFL values following inbreeding cycles. Even though the putative B-lines were in general shorter, the new developed material still taller compared to the recommended height of 100 cm. So, backcrossing with a dwarf CMS source will be necessary to introduce at once the sterility system, the dwarfing gene as well as the panicle exertion trait into the female background.

6 ACKNOWLEDGMENTS

The production of this article is the result of several years of research supported financially by the assistance of several Projects. For the reason we thank the founder of this work which is the Alliance for Green Revolution in Africa – AGRA. Work started which was able to succeed thanks to the financial support of the SMIL, CSAT, DeSIRA_ABEE, and CIMMYT Projects.

ABBREVIATIONS

INRAN: Institut National de la Recherche Agronomique du Niger, OPV: open-pollinated variety, CMS: cytoplasm male sterility, GCA: general combining ability, SCA: specific combining ability, ANOVA: analysis of variance, RCBD: randomized complete block design.

APPENDIX

APPENDIX 1: MEAN PERFORMANCE OF 25 PEARL MILLET GENOTYPES FOR 8 TRAITS ACROSS 2 SITES OVER 2021

Entry	Genotype/Cluster mean	DMI	DFL	PLH	MSD	SPL	SPD	NSH	GY
1	Gam-B-37-30-1-2-1	25	58	215	12	50	24	45	792
2	Gam-B-37-30-1-2-10	7	64	185	13	46	34	40	943
3	Gam-B-37-30-2-5-2	0	62	191	13	43	33	61	1188
4	Gam-B-37-30-2-5-4	2	62	161	14	46	34	37	504
5	Gam-B-37-30-2-5-6	2	62	164	15	45	35	36	467
6	HKB-1-7-6-4-3	25	63	199	14	52	30	46	598
7	HKB-1-7-9-1-2	21	61	209	14	58	23	28	383
8	HKB-1-7-9-1-4	42	63	229	13	59	24	26	319
9	HKB-1-7-9-1-5	10	63	213	14	58	26	36	498
10	HKP-GMS-128-1-14-2-1	5	63	223	14	44	24	50	680
11	HKP-GMS-128-1-196-1-1	12	62	241	13	50	24	51	1018
12	HKP-GMS-128-1-196-1-5	11	70	202	14	50	26	30	376
13	HKP-GMS-128-1-196-4-15	3	63	237	14	53	27	18	275
14	HKP-GMS-128-1-196-4-19	7	65	212	15	44	26	19	348
15	HKP-GMS-128-1-196-4-25	9	66	214	15	51	26	15	285
16	HKP-GMS-128-1-196-4-27	0	63	225	14	54	25	13	202
17	HKP-GMS-128-1-22-1-2	4	64	220	14	47	26	30	387
18	HKP-GMS-128-1-22-1-3	2	64	205	14	41	25	17	262
19	HKP-GMS-128-1-31-1-1	4	63	192	13	49	25	33	369
20	HKP-GMS-128-1-31-1-3	9	70	179	15	41	27	10	121
21	Moro-R-68-17-2-1-4	0	65	226	14	49	24	31	547
22	Moro-R-68-17-2-1-5	7	63	234	13	50	22	49	746
23	HKP	13	60	230	12	55	25	56	1103
24	Zatib	17	64	226	13	52	25	48	1096
25	Local	10	59	247	13	57	25	62	1173
	Gam Cluster	7*	61*	183*****	13*****	46 ^{ns}	32*****	44 ^{ns}	779*****
	HKB Cluster	25 ^{ns}	62 ^{ns}	212 ^{ns}	14 ^{ns}	56 ^{ns}	26*****	34 ^{ns}	452*
	HKP-GMS Cluster	6 ^{ns}	65**	214*****	14 ^{ns}	48*****	26 ^{ns}	26*****	393*****
	Moro-R Cluster	3**	64 ^{ns}	230 ^{ns}	14 ^{ns}	49 ^{ns}	23*	40 ^{ns}	646 ^{ns}
	Checks Cluster	13 ^{ns}	61 ^{ns}	234 ^{ns}	13 ^{ns}	55 ^{ns}	25 ^{ns}	55 ^{ns}	1124 ^{ns}
	Average mean	10*****	63*****	211*****	14*****	50*****	27*****	35*****	588*****

APPENDIX 2: SET-1 MEAN PERFORMANCE OF 26 MILLET GENOTYPES FOR 8 TRAITS ACROSS 2 SITES OVER 2022

Entry	Genotype/Cluster mean	DMI	DFL	PLH	MSD	SPL	SPD	NSH	GY
52	Moro-R-68-17-2-9-1-23-1	5	69	212	18	46	27	37	635
53	Moro-R-68-17-2-9-28-7-2	2	67	203	16	37	24	34	396
54	Moro-R-68-17-2-1-8-1	3	71	213	16	47	25	31	569
55	Moro-R-68-17-2-1-8-2	4	66	215	17	45	30	47	899
56	Moro-R-68-17-2-9-3-1	0	66	217	16	40	28	43	789
57	Moro-R-68-17-2-9-1-23-2	0	68	212	17	48	27	37	599
58	Moro-R-68-17-2-9-6-3	2	66	214	15	40	26	46	668
59	Moro-R-68-17-2-9-1-23-3	0	66	232	15	45	27	48	854
60	Moro-R-68-17-2-9-1-23-4	0	64	213	15	42	25	41	821
61	Moro-R-68-17-2-3-1-3-3	3	68	222	17	42	26	45	937
62	Moro-R-68-17-2-9-28-7-1	1	65	217	16	43	26	50	896
63	Moro-R-68-17-2-9-28-7-3	6	66	287	16	41	25	42	633
64	Moro-R-68-17-2-9-28-7-4	5	63	221	14	40	24	47	736
65	HKP-GMS-128-1-22-1-1-2	3	69	226	18	46	28	40	676
66	HKP-GMS-128-1-31-2-3-1	0	72	217	17	46	27	38	798
67	HKP-GMS-128-1-31-2-3-4	3	66	237	17	50	26	43	753
68	HKP-GMS-128-1-31-2-3-6	1	65	223	14	44	24	46	968
69	HKP-GMS-128-1-196-1-1-1	7	68	210	16	43	26	37	569
70	HKP-GMS-128-1-196-1-1-3	3	70	225	16	47	27	35	635
71	HKP-GMS-128-1-196-1-1-4	2	71	226	18	42	28	39	813
72	HKP-GMS-128-1-196-1-1-6	0	67	223	15	47	27	38	710
73	HKP-GMS-128-1-196-1-1-7	1	65	208	16	44	24	35	446
74	HKP-GMS-128-1-196-1-1-9	1	69	218	16	43	27	30	569
75	HKP-GMS-128-1-196-2-1-2	1	68	214	16	42	25	35	492
76	HKP-GMS-128-1-196-4-27-1	0	67	218	14	39	29	45	778
51	SOSAT-C88	3	62	227	15	37	26	44	659
	Moro-R Cluster	2 ^{ns}	66 ^{ns}	221 ^{ns}	16 ^{ns}	43 ^{ns}	26 ^{ns}	42 ^{ns}	725 ^{ns}
	HKP-GMS Cluster	2 ^{ns}	68 ^{ns}	220 ^{ns}	16 ^{ns}	44 ^{ns}	26 ^{ns}	38 ^{ns}	684 ^{ns}
	Check Cluster	3	62	227	15	37	26	44	659
	Average mean	2 ^{ns}	67 ^{ns}	221 ^{ns}	16 ^{ns}	43 ^{ns}	26 ^{ns}	40 ^{ns}	704 ^{ns}

APPENDIX 3: SET-2 MEAN PERFORMANCE OF 26 MILLET GENOTYPES FOR 8 TRAITS ACROSS 2 SITES OVER 2022

Entry	Genotype/Cluster mean	DMI	DFL	PLH	MSD	SPL	SPD	NSH	GY
26	Gam-B-11-1-14-5-2-4-2-1	6	66	211	15	48	25	42	617
27	Gam-B-11-1-14-32-2-2-1-2	1	65	214	13	37	26	42	713
28	Gam-B-11-1-14-32-13-3-2-2	7	67	211	14	95	23	55	820
29	Gam-B-37-30-1-2-1-1-1	7	66	207	11	44	24	51	859
30	Gam-B-37-30-1-2-1-5-4	2	67	217	12	37	27	51	678
31	Gam-B-37-30-2-5-3-1-1	2	64	357	14	48	27	45	973
32	Gam-B-37-30-2-5-3-1-2	2	67	232	13	44	23	45	699
33	Gam-B-37-30-2-5-3-1-4	9	64	232	16	49	27	34	657
34	Gam-B-37-30-2-5-3-1-5	5	63	209	12	44	22	42	851
35	Gam-B-37-30-2-5-3-1-6	9	68	211	14	44	23	55	737
36	Gam-B-37-30-2-5-7-1-1	4	62	199	14	81	21	57	691
37	Gam-B-37-30-2-5-8-1-1	0	65	198	14	35	24	51	788
38	Gam-B-37-30-2-5-8-1-2	2	65	225	14	42	23	45	749
39	Gam-B-37-30-2-5-8-2-1	3	71	216	16	46	27	29	910
40	Gam-B-37-30-2-5-8-2-2	1	68	214	14	46	25	42	705
41	Moro-R-68-17-2-1-4-4-3	3	67	237	14	56	22	44	705
42	Moro-R-68-17-2-1-5-1-2	2	61	230	14	49	22	38	884
43	Moro-R-68-17-2-1-5-1-3	20	65	220	13	45	26	43	838
44	Moro-R-68-17-2-1-5-1-4	12	66	226	13	43	26	49	872
45	Moro-R-68-17-2-1-5-3-4	4	69	229	17	47	25	41	490
46	Moro-R-68-17-2-1-4-3-2	1	65	235	13	45	26	32	536
47	Moro-R-68-17-2-9-8-3-1	1	66	222	15	53	21	43	837
48	Moro-R-68-17-2-9-12-1-1	5	59	252	14	40	27	50	1058
49	HKP-GMS-128-1-14-2-1-5-1	4	64	221	16	45	24	47	720
50	HKP-GMS-128-1-14-2-1-3-1	3	70	203	13	38	24	38	626
51	SOSAT-C88	5	59	252	14	40	27	50	1058
	Gam Cluster	3 ^{ns}	66**	224 ^{ns}	14 ^{ns}	43*****	25****	46 ^{ns}	763 ^{ns}
	HKP-GMS Cluster	6 ^{ns}	68 ^{ns}	209 ^{ns}	14 ^{ns}	38 ^{ns}	25 ^{ns}	41 ^{ns}	612 ^{ns}
	Moro-R Cluster	6*	66*	227 ^{ns}	14 ^{ns}	48*	24****	42 ^{ns}	735 ^{ns}
	Check Cluster	5	59	252	14	40	27	50	1058
	Average mean	4**	66*****	225 ^{ns}	14*	48 ^{ns}	24*****	44 ^{ns}	754 ^{ns}

APPENDIX 4: MEAN PERFORMANCE OF 26 PEARL MILLET GENOTYPES FOR 8 TRAITS ACROSS ONE SITE OVER 2023

Entry	Genotype/Cluster mean	DMI	DFL	PLH	MSD	SPL	SPD	NSH	GY
77	Gam-B-37-30-2-5-8-2-1-1-1	0	70	192	16	45	37	65	938
78	Gam-B-37-30-2-5-8-2-1-1-2	1	66	175	15	44	37	55	1191
79	Gam-B-37-30-2-5-8-1-1-1	0	62	172	15	47	30	58	945
80	Gam-B-37-30-2-5-8-1-3-3	0	62	148	13	44	32	53	546
81	Gam-B-37-30-2-5-8-2-2-1	1	69	219	14	41	35	46	816
82	Gam-B-37-30-2-5-8-1-3-5	1	74	178	15	41	31	54	785
83	Gam-B-37-30-2-5-8-1-3-6	0	80	164	15	48	33	35	418
84	Gam-B-37-30-2-5-3-1-6-1	2	75	143	18	40	34	30	383
85	Gam-37-30-2-5-3-1-6-2	1	77	176	16	44	33	48	586
86	Gam-B-37-30-2-5-3-1-1-1	1	63	218	15	46	30	66	1301
87	Gam-B-37-30-2-5-3-1-1-2	1	65	165	15	36	36	58	941
88	Gam-B-37-30-2-5-7-1-4-2	0	72	156	14	50	31	56	702
89	Gam-B-37-30-2-5-3-1-2-1	3	90	142	19	47	30	17	472
90	Gam-B-37-30-2-5-8-1-3-4	1	79	192	16	49	31	40	624
91	Gam-B-11-1-14-32-12-1-3-6	0	77	124	13	38	31	46	419
92	Gam-B-11-1-14-32-12-1-2-1	0	81	169	16	51	30	41	318
93	Gam-B-11-1-14-32-12-1-2-4	0	63	236	15	58	31	34	1335
94	Gam-B-11-1-14-32-4-1-1-1	2	80	173	15	44	31	67	1032
95	Gam-B-11-1-14-32-4-1-1-2	1	58	210	12	57	21	44	847
96	Gam-B-11-1-14-32-4-1-1-3	0	65	209	13	54	27	67	1388
97	Gam-B-11-1-14-32-4-1-1-4	3	74	198	16	46	25	47	935
98	Gam-B-11-1-14-32-4-1-1-5	0	68	235	14	56	29	67	1470
99	Gam-B-11-1-14-32-4-1-1-6	1	59	188	15	50	25	70	1299
100	Gam-B-11-1-14-32-4-1-1-7	1	68	218	15	49	29	73	1207
101	Gamoji	2	56	225	12	43	30	67	1227
51	SOSAT-C88	0	62	239	13	29	29	83	1854
	Gam-B-37-30-2-5 Cluster	1 ^{ns}	72*****	174*****	15*	44*	33****	49*****	766****
	Gam-B-11-1-14-32 Cluster	1****	68*****	196*****	14 ^{ns}	50*****	28*****	57*****	1050 ^{ns}
	Check Cluster	0	62	239	13	29	29	83	1854
	Average mean	1***	70*****	187*****	15***	46*****	31*****	53*****	922*****

APPENDIX 5: MEAN PERFORMANCE OF 33 PEARL MILLET GENOTYPES FOR 8 TRAITS ACROSS FOUR SITES OVER 2024

Entry	Genotype/Cluster mean	DMI	DFL	PLH	MSD	SPL	SPD	NSH	GY
102	Gam-B-11-1-14-32-2-2-1-1-4-4	7	61	174	11	44	19	35	601
103	Gam-B-11-1-14-38-18-2-1-1	2	69	214	13	53	19	21	497
104	Gam-B-11-1-14-38-18-2-1-2	4	69	186	12	49	21	24	557
105	HKP-GMS-128-1-196-2-1-1-1-3-3	12	73	199	14	48	22	21	460
106	HKP-GMS-128-1-196-2-1-1-1-3-4	1	70	258	14	50	24	36	1015
107	Moro-R-68-17-2-1-4-3-3	4	66	224	14	55	23	31	783
108	Moro-R-68-17-2-1-4-3-3-2	6	65	199	12	46	21	32	803
109	Moro-R-68-17-2-1-4-3-3-5	6	70	192	14	54	22	16	284
110	Moro-R-68-17-2-1-4-3-3-9	2	69	201	14	51	21	30	691
111	Moro-R-68-17-2-1-4-3-3-11	0	69	223	14	56	20	28	603
112	Moro-R-68-17-2-1-4-3-3-15	9	68	207	13	50	21	36	734
113	Moro-R-68-17-2-1-4-3-3-15-1	5	69	214	13	50	21	32	651
114	Moro-R-68-17-2-1-4-3-3-19-1	4	68	203	14	56	22	28	576
115	Moro-R-68-17-2-1-4-3-3-27	5	71	209	15	60	24	32	728
116	Moro-R-68-17-2-1-4-3-3-32	5	67	192	14	53	23	28	578
117	Moro-R-68-17-2-1-4-3-3-38	5	64	199	13	50	22	33	793
118	Moro-R-68-17-2-1-4-3-3-39	23	68	189	14	51	22	25	546
119	Moro-R-68-17-2-1-4-3-3-42	8	68	205	15	55	22	30	685
120	Moro-R-68-17-2-1-5-1-1-1-21	2	68	220	14	43	25	33	954
121	Moro-R-68-17-2-1-5-1-1-1-22	2	68	204	13	44	24	25	630
122	Moro-R-68-17-2-1-5-1-1-1-24	3	71	203	15	46	27	23	560
123	Moro-R-68-17-2-9-1-23-1-1-1	2	67	205	14	48	27	31	847
124	Moro-R-68-17-2-9-1-23-1-1-1-1	9	66	227	14	44	28	31	940
125	Moro-R-68-17-2-9-1-23-4-70	9	73	192	12	43	23	29	502
126	Moro-R-68-17-2-9-3-1	2	77	186	15	46	28	17	269
127	Moro-R-68-17-2-9-8-3-1-1-2-2	8	69	182	14	50	30	34	612
128	Moro-R-68-17-2-9-8-3-1-1-2-4	4	70	207	14	51	25	26	672
129	Moro-R-68-17-2-9-8-3-1-1-2-10-1	2	72	206	14	49	26	25	572
130	Moro-R-68-17-2-1-4-3-3-45	1	72	203	14	51	22	21	521
131	Moro-R-68-17-2-1-5-1-1-1-27	18	68	215	13	41	27	31	788
23	HKP	14	64	209	14	54	22	42	944
51	SOSAT-C88	2	68	210	14	28	31	33	859
24	Zatib	5	67	226	14	54	23	33	723
	Gam Cluster	4 ^{ns}	67*	191*	12 ^{ns}	49*****	19 ^{ns}	27*	551 ^{ns}
	HKP-GMS Cluster	6 ^{ns}	71 ^{ns}	228 ^{ns}	14 ^{ns}	49 ^{ns}	23***	29**	737**
	Moro-R Cluster	6***	69*	204***	14 ^{ns}	50*****	24*****	28*****	653*****
	Checks Cluster	7 ^{ns}	66 ^{ns}	215 ^{ns}	14 ^{ns}	45*****	25***	36 ^{ns}	842 ^{ns}
	Average mean	6****	68*****	206*****	14 ^{ns}	49*****	24*****	29*****	666*****

REFERENCES

- [1] Ambawat S., Satyavathi C. T., Meena R., Khandelwal V., and Meena R. C., 2020; Molecular characterization and genetic diversity analysis of released hybrids and varieties of pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.]. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 39 (31), 92–104; <https://doi.org/10.9734/cjast/2020/v39i3130994>.
- [2] Andrews D. J. and Bramel-Cox P. J., 1993; Breeding cultivars for sustainable crop production in low input dryland agriculture in the tropics; Printed in *International Crop Science I*; Crop Science Society of America, 677 S. Segoe Rd., Madison, WI 53711, USA; pp: 211-223.
- [3] Andrews D. J., Ejeta G., Gilbert M., Goswami P., Kumar K. A., Maunder A. B., Porter K., Rai K. N., Rajewski J. F., Belum V., Reddy S., Steigmeier W., and Talukdar B. S., 1997; Breeding hybrid, International conference on genetic improvement of sorghum and pearl millet, *In: Proceedings of the international conference on genetic improvement of sorghum and pearl millet*, September 22-27, 1996 Holiday in Plaza Lubbock, Texas; pp: 173-187.
- [4] Ausiku PA, Annandale JG, Steyn JM, Sanewe AJ., 2022; Crop model parameterization of three important pearl millet varieties for improved water use and yield estimation. *Plants*; 11 (6): 806. Available: <https://doi.org/10.3390/plants11060806>.
- [5] Ball Sarah L., 1983; Pathogenic variability of downy mildew (*Sclerospora graminicola*) on pearl millet. I. Host cultivar reactions to infection by different pathogen isolates, *Annals of applied biology*, Vol 102, Issue 2 Pages 257-264. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1983.tb02692.x>.
- [6] Gaoh Bassirou Sani Boubacar, Prakash I Gangashetty, Riyazaddin Mohammed, Mahalingam Govindaraj, Daniel Kwadjo Dzidzienyo, and Pangirayi Tongoona, 2023; Establishing breeding priorities for developing biofortified high-yielding pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) varieties and hybrids in Dosso region of Niger, *Agronomy*: 13, 166. Available online: <https://doi.org/10.3390/agronomy13010166>.
- [7] Bezancon G., Renno J., and Kumar K. A., 2001; Millet *In: Charrier A., Dominique Nicolas*; Tropical plant breeding; pp: 314-337.
- [8] Bidinger R. F. and Hash C. T., 2003; Pearl millet physiology *In: Nguyen T. H., Blum A., Physiology and biotechnology integration for plant breeding*, Imprint: New York, Marcel Dekker, c2004; pp: 225-270.
- [9] Bollam Srikanth, Pujarula Vijayalakshmi, Srivastava Rakesh K., and Gupta Rajeev, 2018; Chapter 11: Genomic approaches to enhance stress tolerance for productivity improvements in pearl millet; 27 pg. https://doi: 10.1007/978-3-319-94746-4_11.
- [10] Buerkert A., Moser M., Kumar K. A., Fürst P., and Becker K., 2001; Variation in grain quality of pearl millet from Sahelian West Africa; *Field Crops Research*, 69: 1-11.
- [11] Choudhary Sunita, Rajpurohit B.S., Khandelwal Vikas, Singh Ummed, and Kumawat Shubham, 2023; Heterosis for grain yield and quality characters in pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) Br.), *Annals of Plant and Soil Research* 25 (1): 157-162, <https://doi.org/10.47815/apsr.2023.10250>.
- [12] De Rouw A., 2004; Improving yields and reducing risks in pearl millet farming in the African Sahel; *Agricultural Systems* 81: 73–93.
- [13] Devos K. M., Hanna W. W., and Ozias-Akins P., 2006; Pearl millet *In: Kole C. (Ed.)*, *Genome mapping and Molecular breeding in plants: Cereals and millets*, 1: 303-323.
- [14] Drabo, I., Zangre, R. G., Danquah, E. Y., Ofori, K., Witcombe, J., & Hash, C. T., 2019; Identifying famers' preferences and constraints to pearl millet production in the Sahel and North-Sudan zones of Burkina Faso. *Experimental Agriculture*, 55 (5), 765-775. Advance online publication. <https://doi.org/10.1017/S0014479718000352>.
- [15] Falconer D.S. and Mackay T. F.C., 1996; Introduction to quantitative genetics, 4th edition; Pearson, Prentice Hall, pp: 1-464.
- [16] Fasoula V. A. and Fasoula D. A., 2002; Principles underlying genetic improvement for high and stable crop yield potential; Elsevier, *Field Crop Research*, 75: 191-209.
- [17] Gajjar K.D., Patel M.S., Zala H.N., Prajapati N.N., and Patel Y.N., 2023; Towards superior pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.] Varieties: Unraveling combining ability and heterosis for improved grain yield, *Biological Forum – An International Journal* 15 (11): 339-348; ISSN No. (Print): 0975-1130, ISSN No. (Online): 2249-3239.
- [18] Gilijamse E., Jeger M. J., 2002; Epidemiology and control of pearl millet downy mildew, *Sclerospora graminicola*, in the Southwest Niger *In: P.T.N. Spencer-Phillips et al. (eds)*, *Advances in downy mildew research*, pp: 189-193.
- [19] Issaka Ahmadou, Ofori Kwadwo, Gracen Edward Vernon, and Danquah Yirenkyi Eric, 2024a; Chapter 9: Genetic potential for pearl millet hybrid development in West Africa, *In: Current Research Progress in Agricultural Sciences Vol. 1*, Print ISBN: 978-81-974255-3-0, eBook ISBN: 978-81-974255-0-9; DOI: <https://doi.org/10.9734/bpi/crpas/v1/260>.
- [20] Issaka Ahmadou, Ofori Kwadwo, Gracen Edward Vernon, and Danquah Yirenkyi Eric, 2024b; Chapter 1: Screening of new developed variety-cross hybrids and resistance of pearl millet hybrids to four isolates of downy mildew (*Sclerospora graminicola* (Sacc.) Shroet.) Vol. 2, Print ISBN: 978-81-976653-6-3, eBook ISBN: 978-81-976653-7-0 DOI: <https://doi.org/10.9734/bpi/crpas/v2/261>.
- [21] Kanfany G., Diack O., Kane N.A., Gangashetty P. I., SY O., Fofana A., and Cisse N., 2020; Implications of farmer perceived production constraints and varietal preferences to pearl millet breeding in Senegal, *African Crop Science Journal*, Vol. 28, No. 3, pp. 411 – 420; doi: <https://dx.doi.org/10.4314/acsj.v28i3.6>.
- [22] Kapila R. K., Yadav R. S., Plaha P., Rai K. N., Yadav O. P., Hash C. T., and Howarth C. J., 2008; Genetic diversity among pearl millet maintainers using microsatellite markers; *Plant Breeding*, 127: 33-37.
- [23] Khair A. N. and Bhanvadia A., 2019; Flowering synchronization studies in parental lines of pearl millet hybrid GHB 905, *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*; 8 (5): 719-722; <http://www.phytojournal.com>

- [24] Kumar Sushil, Charles Thomas Hash, Govind Singh, Nepolean T., Rakesh K. Srivastava, 2021; Mapping QTLs for important agronomic traits in an *Inia*-derived immortal population of pearl millet, *Biotechnology Notes* 2: 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.biotno.2021.06.001>
- [25] Melchinger E. A., Piepho H., Friedrich H. U., Muminovic' J., Wegenast T., To'rje'k O., Altmann T., and Kusterer B., 2007; Genetic basis of heterosis for growth-related traits in arabidopsis investigated by testcross progenies of near-isogenic lines reveals a significant role of epistasis; *Genetics*, 177: 1827–1837.
- [26] Michelmores R. W., Ilott T., Hulbert S. H. and Farrara B., 1988; Chapter 3: The Downy mildews, *Advances in Plant Pathology— Vol. 6* ISBN 0-12-033 706-1.
- [27] Niangado O. and Ouendeba B., 1987; Varietal improvement of pearl millet in West Africa In: *Proceedings of the 10 international pearl millet workshop. 7-11 April 1986, ICRISAT, India*; pp: 95-106.
- [28] Omany G. O., Weltzien Rattunde E., Sogodogo D., Sanogo M., Hanssens N., Guero Y., and Zangre R., 2007; Participatory varietal selection with improved pearl millet in West Africa, *Experimental Agriculture*, 43: 5–19.
- [29] Ouendeba B., Ejeta G., Nyquist W. E., Hanna W. W., and Kumar K. A., 1993; Heterosis and combining ability among African pearl millet landraces, *Crop Sci.*, 33: 735-739.
- [30] Papanna R., Goud, I. S., Vemula, A., Tembhurene, B. V., Meena, M. K., and Gupta, S. K., 2024; Classification of new germplasm into existing heterotic groups of pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.]. *Crop Science*, 1–18. <https://doi.org/10.1002/csc2.21216>.
- [31] Patil K. Sudarshan, Mungra K. D., Danam Shashibhushan, Vemula Anil Kumar, Das R. Roma, Rathore Abhishek, and Gupta S. K.; 2021; Heterotic pools in African and Asian origin populations of pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.] *Scientific Reports* | 11: 12197 | <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91568-7>.
- [32] Prakash HS, Chandra Nayaka, Ramachandra Kin K., 2014; Chapter 4: Downy mildew disease of pearl millet and its control, *Springer Science + Business Media New York*.
- [33] Prem P. J., Rai K. N., Ozias-Akins P., Chen Z., and Hanna W. W., 2006; Genetic improvement of pearl millet for grain and forage production: cytogenetic manipulation and heterosis breeding In: *Genetic Resources, Chromosome Engineering, and Crop Improvement: Cereals*; CRC Press, pp: 281-307.
- [34] Pucher, A., Sy O., Sanogo M.D., Angarawai I.I., Zangre R., Ouedraogo M., 2016; Combining ability patterns among West African pearl millet landraces. *Field Crops Res.* 195: 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.04.035>
- [35] Pucher Anna, Hash C. Tom, Jason G. Wallace, Sen Han, Willmar L. Leiser, and Haussmann Bettina I. G., 2018; Mapping a male-fertility restoration locus for the A4 cytoplasmic-genic male-sterility system in pearl millet using a genotyping-by-sequencing based linkage map, *BMC Plant Biology* (2018) 18: 65 <https://doi.org/10.1186/s12870-018-1267-8>.
- [36] Raj C, Sharma R, Pushpavathi B, Gupta SK, Radhika K., 2018; Inheritance and allelic relationship among downy mildew resistance genes in pearl millet, *The American Phytopathological Society, Plant disease.* 102, N°6.
- [37] Rakshith Papanna, I. Shanker Goud, Anilkumar Vemula, B. V. Tembhurene, M. K. Meena, Shashi Kumar Gupta, 2024; Classification of new germplasm into existing heterotic groups of pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.], *Original article, Special section: International year of millet*.
- [38] Rakshith P., Ayyanna, Hemanth P, Shanker Goud I. and Tembhurne B.V., 2023; Unravelling the interplay of general combining ability and per se performance for grain yield and nutritional quality traits in pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.), *Biological Forum – An International Journal* 15 (10): 875-882.
- [39] Ramya A. Radhika, Ahamed M. Lal, Satyavathi C. Tara, Rathore Abhishek, Katiyar Pooja, Raj A. G. Bhasker, Kumar Sushil, Gupta Rajeev, Mahendrakar D. Mahesh, Yadav S. Rattan, and Srivastava K. Rakesh, 2018; Towards defining heterotic gene pools in pearl millet [*pennisetum glaucum* (L.) r. br.], *Frontiers in Plant Science* | www.frontiersin.org, Volume 8 | Article 1934; doi: 10.3389/fpls.2017.01934.
- [40] Rasitha R, Kalaiyarasi R, Iyanar K, Senthil N, Johnson I, Sujitha R., 2023; Assessment of combining ability and gene action for grain yield and its component traits in pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.], *Biological Forum – An International Journal*. ISSN No. (Online). 2249-3239; <https://doi.org/10.37992/2023.1404.166>
- [41] Rattunde Fred and Witcombe J. R., 1993; Recurrent selection for increased grain yield and resistance to downy mildew in pearl millet, *Plant Breeding* 110 (1): 63 – 72, doi: 10.1111/j.1439-0523.1993.tb00569.x.
- [42] Rattunde HFW, Weltzien E, Bramel- Cox PJ, Kofoed K, Hash CT, Schipprack W, Stenhouse JW, Presterl T, 1997; Population improvement of pearl millet and sorghum: Current research, impact and issues for implementation. In *Proceedings of the international conference on genetic improvement of sorghum and pearl millet*, 188–212; Presented at the International Conference on Genetic Improvement of Sorghum and Pearl Millet, Lubbock, Texas USA.
- [43] République du Niger, 2020; Cabinet du Premier Ministre, Rapport de l'actualisation de l'évaluation de la Vulnérabilité et de l'Adaptation (V&A) aux changements climatiques dans le secteur de l'agriculture au Niger, 104 pg.
- [44] République du Niger, 2021; Catalogue national des espèces et variétés végétales, Comité National des Semences, Ministère de l'Agriculture; pg: 1-83.
- [45] Sattler Felix T., Anna Pucher, Issoufou Kassari Ango, Ousmane Sy, Issaka Ahmadou, C. Tom Hash, and Bettina I. G. Haussmann, 2019; Identification of combining ability patterns for pearl millet hybrid breeding in West Africa; *Crop Science*, vol. 59: 1590–1603. <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.12.0727>.

- [46] Sattler, F.T., Haussmann, B.I.G., 2020; A unified strategy for West African pearl millet hybrid and heterotic group development. *Crop Sci.* 60, 1–13. <https://doi.org/10.1002/csc2.20033>.
- [47] Satyavathi C. Tara, Ambawat Supriya, Khandelwal Vikas, and Srivastava K. Rakesh, 2021; Pearl Millet: Climate-Resilient Nutricereal for mitigating hidden hunger and provide nutritional security, *Front. Plant Sci.* 12: 659938; doi: 10.3389/fpls.2021.659938.
- [48] Serba D. Desalegn, Perumal Ramasamy, Tesso T. Tesfaye, and Min Doo Hong, 2017; Status of global pearl millet breeding programs and the way forward, *Crop Sci.* 57: 2891–2905. doi: 10.2135/cropsci2016.11.0936.
- [49] Serba D.D., O. Sy, M.D. Sanogo, A. Issaka, M. Ouedraogo, I.K. Ango, I. Drabo, and G. Kanfany, 2020; Performance of dual-purpose pearl millet genotypes in West Africa: Importance of morphology and phenology, *African Crop Science Journal*, Vol. 28, No. 4, pp. 377 – 396, DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/acsj.v28i4.4>.
- [50] Sharma Anil Kumar, Rajni Singh Sasode, Sanjay Kharte, and Ravi Kant Pandya, 2023; Screening of Pearl Millet Lines against Downy Mildew Incited by *Sclerospora graminicola* (Sacc.) J. Schrot in Madhya Pradesh, India; *International Journal of Environment and Climate Change* Volume 13, Issue 11, Page 1713-1718, 2023; Article no.IJECC.107894, ISSN: 2581-8627. DOI: 10.9734/IJECC/2023/v13i113326.
- [51] Shull H. G., 1908; The composition of a field of maize; *American Breeders' Association*, pp: 296-301.
- [52] Singh S. D., 1995; Downy mildew of pearl millet; *Plant Disease*, 79: 545–550.
- [53] Srivastava Rakesh K., Srikanth Bollam, Vijayalakshmi Pujarula, Madhu Pusuluri, Ram B. Singh, Gopi Potupureddi and Rajeev Gupta, 2020; Exploitation of heterosis in pearl millet: a review; *Plants* 2020, 9, 807. <https://doi.10.3390/plants9070807>.
- [54] Srivastava Rakesh K., Yadav O. P., Sivasakthi Kaliamoorthy, Gupta S. K., Desalegn D. Serba, Choudhary Sunita, Govindaraj Mahalingam, Kholová Jana, Tharanya Murugesan, Satyavathi C. Tara, Murali Krishna Gumma, Singh Ram B., Srikanth Bollam, Rajeev Gupta and Rajeev K. Varshney, 2022; Breeding Drought-Tolerant Pearl Millet Using Conventional and Genomic Approaches: Achievements and Prospects, *Frontiers in Plant Science* | www.frontiersin.org April 2022 | Volume 13 | REVIEW Article 781524 published: 07 April 2022 doi: 10.3389/fpls.2022.781524.
- [55] Talukdar B. S., Khairwal I. S., and Rattan S., 1999; Hybrid breeding In: Khairwal I.S., Rai K.N., Andrews D.J. and Harinarayana G.; *Pearl millet breeding*, CABI Abstract; pp: 269-30.
- [56] Thakur R. P., Rai K. N., Khairwal I. S., and Mahala R. S., 2008; Strategy for downy mildew resistance breeding in pearl millet in India; *Journal of SAT agricultural research*, 6: 1-11.
- [57] Weltzien R. E., King S. B., 1995; Recurrent selection for downy-mildew resistance in pearl millet, *Plant Breeding*, Volume 114, Issue 4, Pages 308-312; <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.1995.tb01239.x>.
- [58] Weltzien Eva, Fred Rattunde, Mamourou Sidibe, Kirsten vom Brocke, Abdoulaye Diallo.
- [59] Bettina Haussmann, Bocar Diallo, Baloua Nebie, Aboubacar Toure and Anja Christinck, 2020; Bioversity International Chapter 3: Long- term collaboration between farmers' organizations and plant breeding programmes, *Sorghum and pearl millet in West Africa in Farmers and plant breeding*, Current approaches and perspectives, edited by Ola Tveitereid Westengen and Tone Winge; issues in agricultural biodiversity.
- [60] Yadav Om Parkash, Gupta S. K., Govindaraj Mahalingam, Sharma Rajan, Varshney K. Rajeev, Srivastava K. Rakesh, Rathore A., and Mahala Singh Rajendra, 2021; Genetic gains in pearl millet in India: Insights into historic breeding strategies and future perspective, *Frontiers in Plant Science* | www.frontiersin.org, Volume 12 | Article 645038; doi: 10.3389/fpls.2021.645038.

Estimation of the elastic characteristics of mortars reinforced with short *Borassus aethiopum* mart fibers

Abelim Passoli^{1,2}, Tiambo Abbas Datchossa¹, Emmanuel Olodo¹, and Douti Lare³

¹Laboratory of Applied Energetics and Mechanics (LAEM), Polytechnic School of Abomey-Calavi,
University of Abomey-Calavi, Benin

²National Institute for Scientific Research of the University of Lomé (NISR-UL), University of Lomé, Togo

³Laboratory of Research in Engineering Sciences (LRES), Polytechnic School of Lomé, University of Lomé,
01BP1515 Lomé 01 Togo

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

ABSTRACT: No sustainable development can be achieved or have any real meaning if it does not promote the use of local materials. In the northern regions of West Africa, one of the potentials to be developed for the benefit of construction is the use of *Borassus aethiopum* mart fibers (BAMF). The aim of this work is to estimate the elastic characteristics of mortars reinforced with *Borassus aethiopum* mart fibers to encourage the use of this material.

To achieve this, we formulated a cement mortar, in accordance with the requirements of standard EN 196-1, reinforced with 10% *Borassus aethiopum* mart fibers, in volume fraction. The reference mortar is denoted M0, while the mortar reinforced with BAMF is denoted MB. The characteristics were estimated using the homogenization formula (HF) and the Hashin-Shtrikman upper and lower bounds. The characteristics of the mortar and the *Borassus aethiopum* mart fibers were determined before they were considered in the composite material characterization model.

The results of the study show that the Hashin-Shtrikman bounds have acceptable values for limiting the range of validity of the elastic characteristics of the material. The homogenization formula proposes an increased value for the elastic characteristics of composite materials, although it still gives an idea. The Hashin-Shtrikman HS⁺ upper bound gives the most acceptable value for Young's modulus of elasticity, which is 22.11GPa for a Poisson's ratio of 0.15.

KEYWORDS: Mortar, *Borassus aethiopum* mart short fibers, elastic characteristics, homogenization.

1 INTRODUCTION

Development is the desire of every people, every nation, every country. Development means development in all areas of human life, starting with housing. In fact, housing is one of the most captivating parameters when it comes to the level of affluence of a people or an individual.

However, it's impossible to raise the standard of housing without revolutionizing building materials and mastering them. The current trend is not only towards large-scale production, but also the use of sustainable materials [1], [2]. As a result, builders in recent decades have been greatly encouraged to focus on materials based on plant biomass. This is justified by the great interest shown by the scientific community in this type of material [3], [4], [5], although it should be pointed out that the valorization of plant biomass is a waste management alternative [6].

However, most of the biomass plant-based materials deal with the possibility of using these reinforcements in polymer matrix [7]. Only a few propose their use in cementitious matrix materials [8], [9]. Even fewer studies focus on the use of *Borassus aethiopum* mart fibers as reinforcement in cementitious matrices.

The aim of the present work is to propose an estimate of the elastic characteristics of mortars reinforced with Borassus aethiopum mart fibers, to encourage their use as construction materials.

2 MATERIALS AND METHOD

2.1 MATERIALS

The material covered by this study is mainly mortar reinforced with Borassus aethiopum mart fibers.

2.2 METHOD

2.2.1 FORMULATION OF MORTARS REINFORCED WITH BORASSUS AETHIOPUM MART FIBERS

The Borassus aethiopum mart fibers-based mortar (MR), whose elastic characteristics are assessed, is obtained by replacing 3% of the volume fraction of M0 mortar with Borassus aethiopum mart fibers. The reference mortar (M0) is formulated in accordance with EN 196-1.

2.2.2 PRINCIPLE OF HOMOGENIZATION

Homogenization aims to provide a means of estimating the characteristics of a heterogeneous material by considering the characteristics of the various constituents. The constituents can be summarized as the matrix and the reinforcements. To simplify the calculations, which could prove very complex, the following assumptions are made:

- inclusions and matrix are linearly elastic and isotropic.
- inclusions are axisymmetric: their shapes and sizes are identical and are characterized by their aspect ratio $r=L/D$, where L is the length of the inclusions and D is their diameter.
- inclusion-matrix adhesion is perfect at the interface and remains so throughout deformation.

2.2.3 MATERIAL COMPONENTS

The study material consists of cement mortar and roast tree fibers. The cementitious mortar acts as a matrix, while the Borassus aethiopum mart fibers act as reinforcements.

2.2.4 METHODS FOR ESTIMATING THE ELASTIC CHARACTERISTICS OF BORASSUS AETHIOPUM MART FIBERS-REINFORCED CEMENTITIOUS MORTAR

- Homogenization formula

The young's modulus is given by:

$$E = V_m E_m + V_i E_i \quad (1-1)$$

The Poisson's ratio is given by:

$$\nu = V_m \nu_m + V_i \nu_i \quad (1-2)$$

- Hashin-Shtrikman Bounds

Hashin and Shtrikman [10], [11] use the solution of Eshelby's problem by considering an equivalent homogeneous material surrounding the inclusions by the various composite constituents (reference material). If the reference material is the most "rigid" of the constituents, the estimate gives an upper bound (HS⁺). But when the reference material is the least rigid of the constituents, we obtain the lower bound (HS⁻) [12]. The Hashin and Strikman (HS) bounds can be written as:

$$C^{HS-} \leq C_{hom}^{HS} \leq C^{HS+} \quad (1-3)$$

Lower bound of Hashin-Shtrikman (HS⁻)

$$C^{HS-} = [V_m C_m : (C_{min}^* + C_m)^{-1} + V_i C_i : (C_{min}^* + C_i)^{-1}] : [V_m C_{min}^* + C_m)^{-1} + V_i : (C_{min}^* + C_i)^{-1}]^{-1} \quad (1-4)$$

Upper bound of Hashin-Shtrikman (HS⁺)

$$C^{HS^+} = \left[[V_m C_m : (C_{max}^* + C_m)^{-1} + V_i C_i : (C_{max}^* + C_i)^{-1}] : [(V_m C_{max}^* + C_m)^{-1} + V_i : (C_{max}^* + C_i)^{-1}] \right]^{-1} \quad (1-5)$$

Where C_{min}^* and C_{max}^* are defined as:

$$\begin{cases} C_{min}^* = E^{-1} : C_{min} - C_{min} & \text{où } C_{min} = \min(C_m, C_i) \\ C_{max}^* = E^{-1} : C_{max} - C_{max} & \text{où } C_{max} = \max(C_m, C_i) \end{cases}$$

E being the Eshelby tensor.

2.2.5 CHARACTERISTICS OF COMPONENTS

The table below shows the Young's modulus and Poisson's ratio of mortar and rônier fibers. The Young's modulus of Borassus aethiopum mart fibers is taken from the work of Gbaguidi [13].

Table 1. Young's modulus and Poisson's ratio of matrix and inclusions

Formulations	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
MR	24,35	0.15
FR	16,00	0.14

Fiber shape factor: 5;

Volume fraction of fibers: 10%

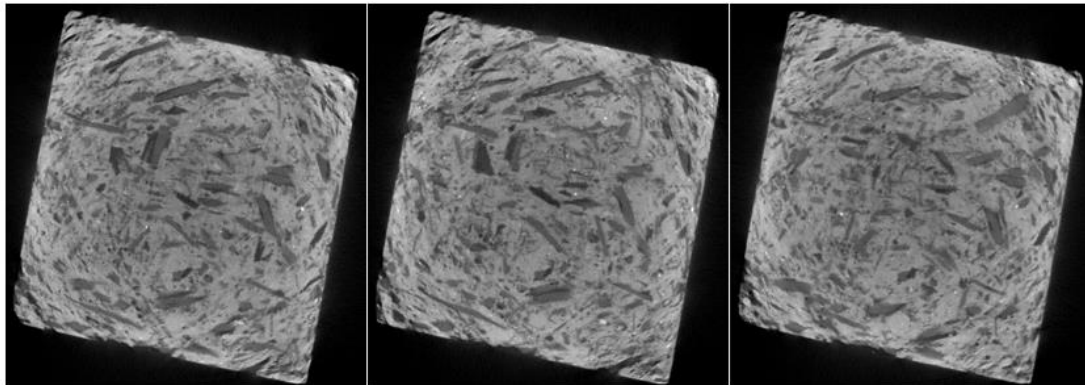


Fig. 1. Distribution of Borassus aethiopum mart fibers in cement mortar

Figure 1 shows that the material can be assimilated to an isotropic material, since the distribution of fibers within it is random.

2.2.6 DETERMINATION OF ELASTIC PARAMETERS

- Determining the Lamé coefficients

The Lamé coefficients, λ and μ are read from the material stiffness matrices, the results of equations (1-4) and (1-5).

- Determination of elastic characteristics.

Since the material is isotropic, the Young's modulus and Poisson's ratio can be given by the formulas:

$$E = \frac{\mu \times (3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \quad (1-3)$$

$$\nu = \frac{\lambda}{2 \times (\lambda + \mu)} \quad (1-4)$$

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 VALUES OBTAINED FROM THE HOMOGENIZATION FORMULA

$$E = 23,51\text{GPa}; \nu = 0.149.$$

It should be noted that these values are directly functions of the volume fraction of the various constituents of the composite material.

3.2 LOWER BOUNDS OF HASHIN-STRIKEMAN (HS-)

$$\begin{bmatrix} 23.29 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 13.39 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 13.39 \\ 0.00 & -3.49 & 0.00 & 13.39 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & -3.49 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 13.39 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 13.39 & 0.00 & -3.62 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 13.39 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 23.29 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 13.39 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & -3.49 & 0.00 & 13.39 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 13.39 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & -3.49 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 13.39 & 0.00 & -3.49 & 0.00 \\ 13.39 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 13.39 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 23.29 \end{bmatrix}$$

From this matrix we read the following Lamé coefficients: Lambda $\lambda = -3.49$; Mu $\mu = 13.39$. The elastic characteristics obtained are Young's modulus E and Poisson's ratio ν . $E=22.06\text{GPa}$; $\nu=0.15$ From this matrix we read the following Lamé coefficients: Lambda $\lambda=-3.49$; Mu $\mu=13.39$. The elastic characteristics obtained are Young's modulus E and Poisson's ratio ν . $E = 22.06\text{GPa}$; $\nu = 0.15$

3.3 UPPER BOUNDS OF HASHIN-SHTRIKMAN (HS+)

$$\begin{bmatrix} 22.32 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 13.40 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 13.40 \\ 0.00 & -3.47 & 0.00 & 13.40 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & -3.47 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 13.40 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 13.40 & 0.00 & -3.47 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 13.40 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 22.32 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 13.40 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & -3.47 & 0.00 & 13.40 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 13.40 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & -3.47 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 13.40 & 0.00 & -3.47 & 0.00 \\ 13.40 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 13.40 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 22.32 \end{bmatrix}$$

From this matrix we read the following Lamé coefficients: Lambda $\lambda = -3.47$; Mu $\mu = 13.40$. The elastic characteristics obtained are Young's modulus E and Poisson's ratio ν . $E = 22.11\text{GPa}$; $\nu = 0.15$

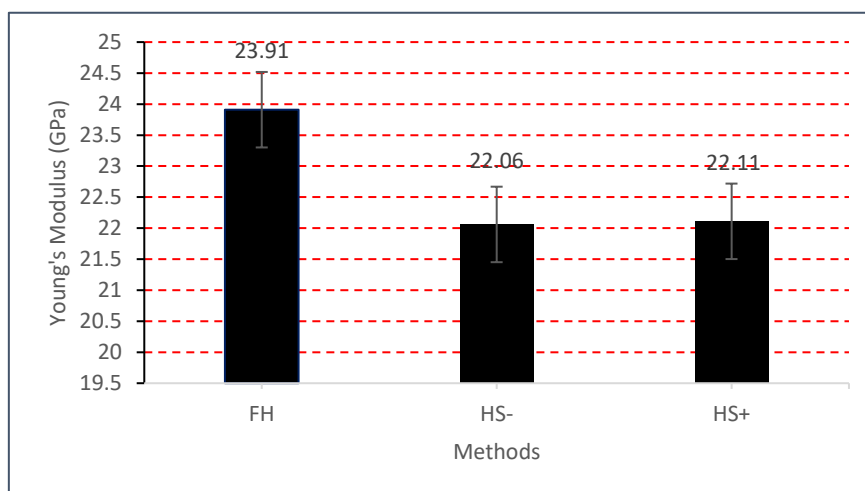


Fig. 2. Young's modulus variation as a function of estimation method

Figure 2 shows the evolution of Young's modulus of elasticity as a function of the method used to estimate its value.

From this figure, we can see that the Young's modulus obtained by the homogenization formula (HF) has a higher value, compared to the values obtained with the lower (HS-) and upper (HS+) bounds of Hashin-Shtrikman. We can also see that HS- has a lower value than HS+. This is quite normal, since the maximum limit of characteristics that the material can have been expressed here by HS+. It's easy to see that there's little difference between the values proposed by the lower and upper bounds of Hashin-Shtrikman. As a result, each of the HS- and HS+ values is potentially a value of the Young's modulus of the Borassus aethiopum mart fibers-reinforced mortar.

From the analysis of this table, we can say that the homogenization formula overestimates the elastic characteristics of our composite [12]. This could be explained by the fact that the homogenization formula does not consider the microstructural data of the various constituents [14], [15].

4 CONCLUSION

This study made it possible to estimate the bounds within which the elastic characteristics of Borassus aethiopum mart fibers-reinforced mortars should lie. The homogenization formula and Hashin-Shtrikman bounds were used to estimate the elastic characteristics of Borassus aethiopum mart fibers-reinforced mortars. The following points can be drawn from this work:

- The homogenization ant is a macroscopic estimate that gives an idea of the expected value but is less precise.
- The homogenization formula increases the actual characteristics of the composite material.
- Hashin-Shtrikman's bounds show small deviations.
- The upper bound of Hashin-Shtrikman gives an intermediate value to the homogenization formula and the lower bound of Hashin-Shtrikman.

The values provided by the Hashin-Shtrikman method are potentially representative of the elastic characteristics of Borassus aethiopum mart fibers-based mortar.

REFERENCES

- [1] N. Abdolhossein et E. Stephen, « Effect of different mixture parameters on the setting time of fly ash/rice husk ash-based geopolymer mortar », *MATEC Web Conf.*, vol. 361, p. 05001, janv. 2022, doi: 10.1051/mateconf/202236105001.
- [2] D. G. Devadiga, K. S. Bhat, et G. Mahesha, « Sugarcane bagasse fiber reinforced composites: Recent advances and applications », *Cogent Eng.*, vol. 7, n° 1, p. 1823159, janv. 2020, doi: 10.1080/23311916.2020.1823159.
- [3] G. Ruano, F. Bellomo, G. López, A. Bertuzzi, L. Nallim, et S. Oller, « Mechanical behaviour of cementitious composites reinforced with bagasse and hemp fibers », *Constr. Build. Mater.*, vol. 240, p. 117856, avr. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117856.
- [4] A. T. Datchossa, V. K. Doko, N. Kabay, E. E. T. Olodo, et T. Omur, « Evaluation of the Effects of Untreated and Treated Sugarcane Bagasse Fibers and RHA on the Physicomechanical Characteristics of Cementitious Composites », *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng.*, avr. 2023, doi: 10.1007/s40996-023-01104-y.
- [5] P. Acodji, K. V. Doko, et E. T. E. OLODO, « Fatigue Behaviour Study of a Cement Matrix Composite Reinforced by Sugar Cane Bagasse Short Fibers », *Curr. J. Appl. Sci. Technol.*, p. 33-40, juin 2020, doi: 10.9734/cjast/2020/v39i1730750.
- [6] N. T. Hussien et A. F. Oan, « The use of sugarcane wastes in concrete », *J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 69, n° 1, p. 31, mars 2022, doi: 10.1186/s44147-022-00076-6.
- [7] Laboratory of Applied Energetics and Mechanics (LEMA), Polytechnic School of Abomey-Calavi, University of Abomey-Calavi, 01BP2009 Cotonou Benin. *et al.*, « THERMAL CONDUCTIVITY OF RICE HUSK ASH MORTAR REINFORCED WITH SUGARCANE BAGASSE », *Int. J. Adv. Res.*, vol. 12, n° 01, p. 929-934, janv. 2024, doi: 10.21474/IJAR01/18205.
- [8] A. Passoli, T. A. Datchossa, D. Lare, et E. Olodo, « The Environmental Benefits of Using Sugarcane Bagasse in Cement Mortars », *Curr. J. Appl. Sci. Technol.*, vol. 42, n° 47, p. 86-91, 2023, doi: 10.9734/CJAST/2023/v42i474319.
- [9] A. T. Datchossa, V. K. Doko, N. Kabay, E. E. T. Olodo, et T. Omur, « Evaluation of the Effects of Untreated and Treated Sugarcane Bagasse Fibers and RHA on the Physicomechanical Characteristics of Cementitious Composites », *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng.*, avr. 2023, doi: 10.1007/s40996-023-01104-y.
- [10] Z. Hashin et S. Shtrikman, « Note on a variational approach to the theory of composite elastic materials », *J. Frankl. Inst.*, vol. 271, n° 4, p. 336-341, avr. 1961, doi: 10.1016/0016-0032 (61) 90032-1.
- [11] Z. Hashin et S. Shtrikman, « A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials », *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 11, n° 2, p. 127-140, mars 1963, doi: 10.1016/0022-5096 (63) 90060-7.

- [12] C. E. Adadja, « Modélisation multi-échelles des propriétés élastiques du composite argile-pailles de riz », These de doctorat, Université de Lorraine, 2020. Consulté le: 25 juillet 2021. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2020LORR0067>.
- [13] V. Gbaguidi, A. Gbaguidi, M. Gibigaye, E. Adjovi, B. Sinsin, et T. Amadji, « Determination experimentale des principales caracteristiques physiques et mecaniques du bois du rônier (*borassus aethiopum* Mart.) d'origine beninoise », *J. Rech. Sci. Univ. Lome*, vol. 12, n° 2, juill. 2011, doi: 10.4314/jrsul.v12i2.68046.
- [14] M. Bornert, « Microstructural morphology and mechanical behaviour; experimental characterizations, bounds and generalized self-consistent estimates », phdthesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1996. Consulté le: 10 janvier 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00113078>.
- [15] M. Musielak, « Etude numérique et expérimentale des transferts de composés organiques volatils du sol à l'air ambiant, en passant au travers du béton », phdthesis, Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2012. Consulté le: 28 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-04282312>.

Le commerce informel à Bouaké face au défi de la ville intelligente et durable

[Informal trade in Bouaké faces the challenge of the smart and sustainable city]

Koffi Guy Amoatta¹, Pépé Julien Lamah², Julien Yao Koffi³, and Alain François Loukou³

¹Département de Géographie, Université de Kindia, Kindia, Guinée

²Département de Géographie, Université Général Lanssana Conté de Sonfonia, Conakry, Guinée

³Département de Géographie, Université de Bouaké, Bouaké, Côte d'Ivoire

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

ABSTRACT: Smart and sustainable city must meet six criteria according to Giffinger. This paper analyzes the probability of the city of Bouaké becoming a smart and sustainable city in a context of informal trade dominance. The conduct of this study is based on conducting a survey to collect qualitative and quantitative data. An interview guide is administered to the various actors involved in urban and digital development. As for the investigation, it is directed at traders. From this it follows that informal trade is the main source of urban employment. While the practice of this activity generates a frantic production of garbage and the presence of traders created a real urban entropy. In addition, green spaces are becoming public markets, sites of international institutions, housing, etc. Moreover, the digital divide is characterized by the persistence of gray areas. This situation does not facilitate the appropriation of digital by populations and administrations.

KEYWORDS: Bouaké, informal trade, Smart and sustainable city, urbanization, entropy.

RESUME: Une ville intelligente et durable doit respecter six critères selon Giffinger. Ce papier analyse la probabilité de la ville de Bouaké à devenir une ville intelligente et durable dans un contexte de dominance du commerce informel. La conduite de cette étude repose sur la conduite d'une enquête afin de recueillir des données qualitative et quantitative. Un guide d'entretien est administré aux différents acteurs intervenant dans l'aménagement urbain et numérique. Quant à l'enquête, elle est dirigée à l'endroit des commerçants. Dès lors, il ressort de cela que le commerce informel est la principale source d'emplois de ville. Alors que la pratique de cette activité engendre une production effrénée des ordures et la présence des commerçants créés une véritable entropie urbaine. En outre, les espaces verts se muent en marché public, en site d'institution internationale, de logements, etc. De plus, la fracture numérique est caractérisée par la persistance des zones grises. Cette situation ne facilite pas l'appropriation du numérique par les populations et les administrations.

MOTS-CLEFS: Bouaké, commerce informel, ville intelligente et durable, urbanisation, entropie.

1 INTRODUCTION

Débuté timidement, le processus d'urbanisation a connu un développement fulgurant après les indépendances. De 5 % avant les indépendances, le taux d'urbanisation est passé de 42,5 % en 1998 à 49,7 % en 2014 [1]. Cette urbanisation rapide est à la fois liée à un accroissement naturel élevé et aux flux migratoires des pays limitrophes en direction de la Côte d'Ivoire. Aussi, l'exode rural ainsi que le développement du secteur privé en milieu urbain jouent un rôle important dans la dynamique urbaine. Cependant, la crise économique de 1980 a favorisé la perte de l'emploi d'une frange de la population. Certaines populations se sont retrouvées vers les activités informelles. La chute des prix de produits agricoles d'exportation notamment le binôme café-cacao qui faisait la force de l'État, a emmené la Côte d'Ivoire à alléger ses charges et promouvoir l'initiative privée en confiant, ainsi une partie de son pouvoir aux élus locaux dont le rôle était de créer des ressources capables de maintenir les populations sur place par des emplois. Cette politique n'a pas produit les

résultats escomptés en matière d'emplois. On assiste à une augmentation du taux de pauvreté dû au chômage. Ainsi de 10 % en 1985, il passe progressivement à 36,8 % en 1995, 38,4 % en 2002 avant d'atteindre 48,9 % en 2008 et 46,3 % en 2015 [2]. Alors, le secteur informel demeure le plus grand pourvoyeur d'emplois en Côte d'Ivoire. En 2014, la population active représentait 48 % de la population totale et 89 % des emplois étaient dans le secteur informel, 5 % dans le secteur privé formel et 4 % dans le secteur public et parapublic [3].

Dans les années 80 la situation de l'emploi est devenue préoccupante en Côte d'Ivoire. Cela se manifeste par une réduction des emplois dans le secteur moderne, du fait de la restructuration de nombre d'entreprises étatiques, entreprise et exécutée dans le cadre des programmes d'ajustement structurel. La conséquence de cette mesure est le développement du secteur informel, en particulier en milieu urbain. La ville de Bouaké ne fait pas exception [4]. A Bouaké, surtout là où le tissu urbain est irrégulier, les activités informelles se concentrent le long du périmètre de l'îlot, donnant généralement sur la rue la plus fréquentée [5]. Cette situation entraîne une occupation illégale du domaine public. Toutefois, le concept de « ville intelligente » ouvre des perspectives qui varient en fonction des pays. Dans les pays en développement, il s'agit avant tout de proposer des infrastructures qui permettent de soutenir une urbanisation accélérée. À cet égard, des applications infrastructurelles intelligentes offrent un raccourci technologique [6]. De ce fait, il faut rappeler que l'usage des télécommunications à Bouaké date de 1904 avec l'ouverture d'un bureau de Poste Télégraphe et Téléphone [7]. Dès lors, comment la prédominance du commerce informel fait-elle obstacle à la mutation de Bouaké en une ville intelligente et durable ? Ce papier est une contribution à l'appréhension de la question de la ville intelligente et durable dans une ville où le commerce informel prime sur le commerce formel.

La rédaction de ce papier s'appuie sur des données qualitatives et quantitatives. Les données qualitatives sont issues de l'administration d'un guide d'entretien semi-directif à des autorités administratives. En outre, une enquête a été menée auprès de la population commerçante et la consultation des ouvrages statistiques ont constitué le soubassement quantitatif de ce papier. Il ressort de cela que les productions scientifiques sur la question de la ville intelligente et durable ne sont pas abondantes. Cette insuffisance de la littérature grise est due au fait que la problématique de ville intelligente est relativement récente. Alors, la conduite de cette étude a nécessité un soubassement théorique en vue de cerner les contours des différents termes. Partant de là, cette étude s'articule autour de deux axes. Le premier axe analyse le commerce informel en tant qu'un tremplin pour l'intelligence et de la non-durabilité de la ville Bouaké. Quant au second axe, il met en exergue les stratégies pour la mutation de Bouaké en une ville intelligente et durable.

2 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

2.1 CADRE THÉORIQUE ET CONCEPTUEL

2.1.1 LA NOTION DE LA VILLE INTELLIGENTE: QUE RETENIR ?

L'expression de « ville intelligente » est une traduction française de l'expression anglo-saxonne *Smart-city*. Elle désigne une ville novatrice qui utilise les TIC et d'autres moyens pour améliorer la qualité de vie, l'efficacité de la gestion urbaine et des services urbains ainsi que la compétitivité, tout en respectant les besoins des générations actuelles et futures dans les domaines économique, social et environnemental [8]. Rudolf Giffinger a défini les différents critères caractérisant une ville intelligente et durable. Ces critères sont au nombre de six: voir la figure 1.

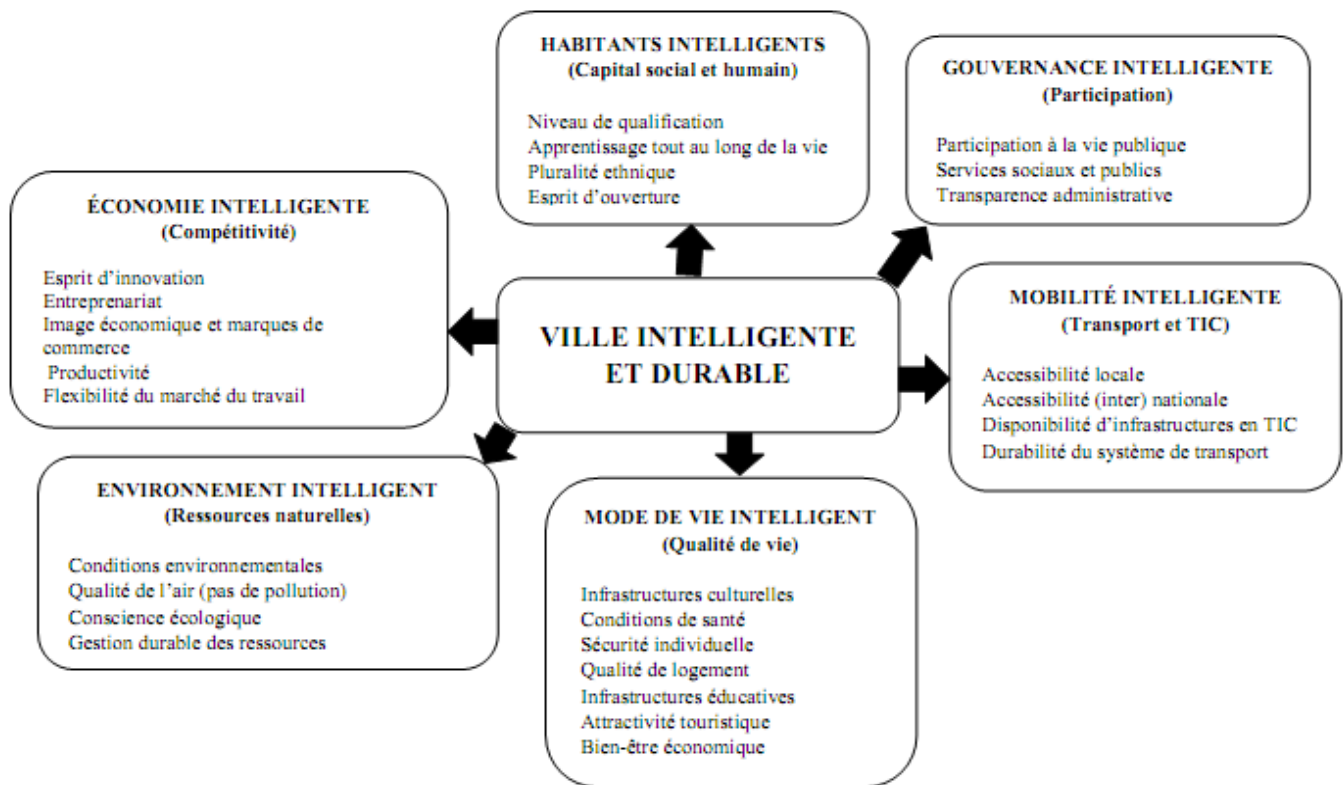


Fig. 1. Différents composants de la ville intelligente et durable

Source: Amoatta et Koffi, 2018, inspiré de Giffinger, s. d.

Le développement de la ville intelligente nécessite une démarche d'innovation qui implique divers enjeux. Le premier enjeu est celui de l'attractivité, tant pour la compétitivité territoriale que pour répondre aux attentes des citoyens. Le deuxième enjeu est d'ordre politique et social: la ville intelligente doit être ouverte et innovante, et non pas privatisée, externalisée ou technicisée, ce qui le ferait échapper aux autorités locales et aux citoyens au bénéfice de la seule expertise et de la logique des systèmes techniques; elle doit permettre de résoudre les tensions urbaines et de réaliser la ville durable [9]. Le troisième enjeu est d'ordre financier: comment financer cette innovation ?

2.1.2 LA VILLE DURABLE: UNE NOTION EXISTANT DEPUIS QUARANTE ANS

La notion de ville durable (*sustainable city*) est calquée sur la notion de développement durable (*sustainable development*). Le développement durable est un mode de développement qui répond aux besoins des générations présentes, à commencer par les plus démunies, sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs [10]. D'ailleurs, la première conférence sur les villes durables s'est tenue à Aalborg, au Danemark, en 1994. L'idée est de traduire au niveau local les principes du sommet de la Terre de Rio (1992) et la mise en place d'agenda 21 locaux [11]. Les principaux points concernent un mode de vie dit durable: de la gouvernance à la gestion locale vers la durabilité ou encore l'équité sociale et la justice. Par ailleurs, on distingue quatre champs d'intervention de la ville durable qui s'emboîtent [12]:

- Politiques climatiques: plans de réduction du CO₂ urbain, énergies renouvelables;
- Politiques de mobilité et de planification: densification, renouvellement urbain, polycentrisme, trames d'espaces naturels et agricoles;
- Politiques d'écoconstruction: quartiers ou lotissements « durables »;
- Agendas 21 locaux: outil d'accompagnement, de sensibilisation, d'inflexion des modes de vie (initiatives d'habitants ou d'acteurs, projets de services).

La concrétisation de la notion de ville durable se symbolise par la construction d'éco-quartiers, d'éco-îlots ou de quartiers durables. Les exemples suivants représentent actuellement les villes durables: Masdar (Abu Dhabi), de Bonne (Grenoble), Vesterbro (Copenhague), de Bed-Zed (Londres) ou de Vauban (Fribourg). Ces territoires sont dotés d'équipements respectueux de l'environnement et fonctionnant à l'énergie renouvelable. Comme le montre l'exemple ci-dessus, les villes durables se concentrent dans les pays développés.

2.1.3 LES CARACTÉRISTIQUES DU COMMERCE INFORMEL

Le secteur informel comprend toutes les activités opérant en dehors du système fiscal et légal, sur lesquelles nous ne disposons pas, de ce fait, d'informations statistiques fiables [13]. Par ailleurs, le secteur informel comme l'ensemble des unités de production dépourvues de numéro de compte contribuable et/ou de comptabilité écrite formelle [14]. Il se caractérise également par une grande précarité des conditions d'activité. Il aussi dominé par les activités commerciales. De ce fait, c'est un secteur échappant à toute réglementation administrative et juridique, employant une main-d'œuvre familiale, appliquant des horaires souples, recourant à des sources informelles de crédit et fabricant des produits finalisés (par opposition à des produits intermédiaires). Les travailleurs de ces entreprises ont rarement accès à l'enseignement scolaire, utilisent peu d'énergie électrique et mènent des activités semi-permanentes [15]. Toutefois, le secteur informel fournit des revenus à ceux qui ont quitté les zones rurales pour travailler dans les grandes villes. En outre, le travail informel est un moyen d'échapper au chômage généralisé. Beaucoup de gens d'un faible niveau d'éducation ne trouvent pas de travail dans le secteur formel, mais ils ont une chance dans le secteur informel [16]. Le secteur informel se compose d'un large segment du marché du travail caractérisé par des faibles niveaux de capital, des faibles compétences, de la difficulté à accéder aux marchés organisés et à la technologie, les revenus faibles et instables [16].

2.2 MÉTHODE DE COLLECTE DE DONNÉES

2.2.1 LA METHODE DE COLLECTE DE DONNEES

La collecte des données se repose sur les données qualitatives ainsi que quantitatives. Les données qualitatives et quantitatives sont constituées de la littérature grise et l'administration d'un questionnaire semi-directif aux collectivités décentralisées. Puis, les informations sont complétées par une enquête de terrain. La population enquêtée est constituée de commerçants. Les critères suivants ont été retenus pour l'administration du questionnaire: occupation anarchique du domaine public, pas de livre comptable, et ne possédant pas de registre de commerce. La figure 2 montre les localités d'enquêtes. Le choix de ces localités est légitimé par la présence d'espace vert et de la présence du commerce informel. Le manque de statistique fiable sur le nombre réel des commerçants exerçant dans le secteur informel, nous a conduit à élaborer un échantillon par quota. Nous avons enquêté 15 personnes par quartier retenues. Donc le nombre de personnes enquêtés s'élève à 75.

2.2.2 LA PRÉSENTATION DU CADRE SPATIAL

La ville de Bouaké est située au centre de la Côte d'Ivoire. Elle est une ville carrefour par laquelle transitent les productions agricoles, les populations et les articles divers en direction des autres villes de la Côte d'Ivoire et vers les pays frontaliers. En outre, la ville dispose d'une panoplie d'industries et d'une population hétérogène.

Cette ville a été l'épicentre de la crise militaro-politique durant plus d'une décennie. Cette situation a eu un impact négatif sur les populations et le paysage urbain. Après cet épisode cauchemardesque, la ville de Bouaké renoue avec le développement laissant une grande partie de sa population dans une précarité sans précédent. Face à cette instabilité économique, la population s'adapte en se rabattant sur les activités informelles dont leur exercice n'exige pas un local mais emprunte les espaces publics et les voies de communications comme substrat. Les acteurs de ces activités usent d'ingéniosité vocale et occupe des points stratégiques de la ville à l'affût de clients. Cette conquête de la clientèle les emmène à occuper les sites inappropriés car ils renferment des grands risques. Aussi, ces activités sont de véritables sources de productions d'ordures à l'échelle des espaces publics et privés de la ville.

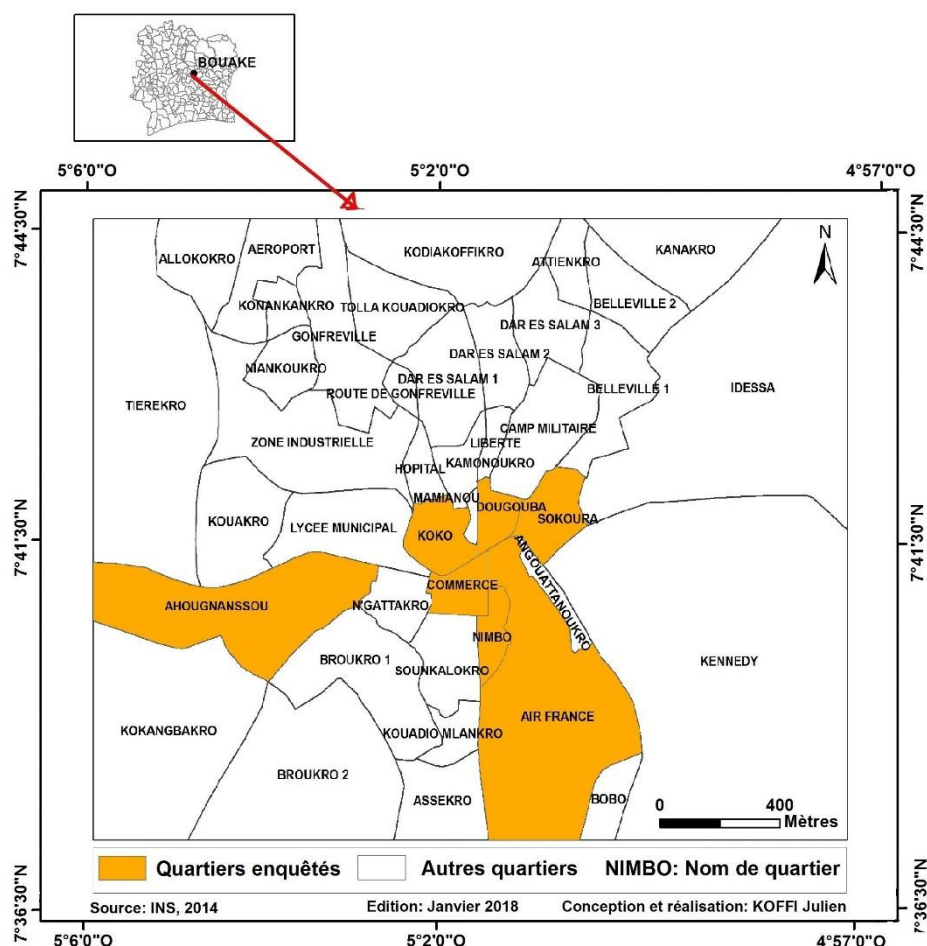


Fig. 2. Présentation de la localité d'étude et quartiers enquêtés

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 LE COMMERCE INFORMEL, UN TREMPIN POUR L'ININTELLIGENCE ET DE LA NON DURABILITE DE LA VILLE BOUAKE

3.1.1 LE COMMERCE INFORMEL: UNE SOURCE D'ENTROPIE SPATIALE

L'occupation anarchique de la voie publique par les petits commerçants à Bouaké met à nu les problèmes de gouvernance inintelligente et d'habitants inintelligents. L'entropie spatiale est caractérisée par l'occupation illégitime des domaines publics ou privés par les commerçants. Les lieux les plus prisés sont la chaussée et devant les gares routières. Les voies de circulation sont les plus affectées par cette occupation illégale. En effet, la vocation première d'une chaussée est de faciliter la circulation des personnes. Néanmoins, cette espace peut se transformer en un lieu d'échange, de vie où l'on interagit. Si le premier rôle de la voirie de la voirie est la circulation des personnes et des biens, il est transformé progressivement par les acteurs du secteur informel à leurs fins. Les itinérants sont aussi considérés comme des hors la loi. Ils déambulent sur les trottoirs et les points stratégiques. Aux abords des gares routières viennent se greffer un grand nombre d'activités qui relèvent majoritairement du secteur informel. Faute d'aménagement, ces activités génèrent d'importantes nuisances, notamment au niveau des conditions de circulation des véhicules et d'exploitation de ces gares [17].

La figure 3 montre la répartition des acteurs du commerce informel. Elle montre une concentration des activités informelles au centre de la ville. Cela s'explique par le fait que centre de la ville représente le poumon économique de la ville. Les autres quartiers sont des quartiers relais avec les habitants comme les clients. Alors que, les quartiers centraux accueillent des personnes en transit.

Les raisons de développement de ces emplois précaires est la fermeture de plusieurs entreprises dont certaines peinent à rouvrir. La cessation temporelle ou définitive de ces entreprises a fait perdre sa deuxième place en tant que second pôle économique du pays au profit de la ville de San-Pédro [18].

Ainsi, cette crise a entraîné une désintégration du tissu industriel de la ville favorisant un chômage grandissant au sein de la population, car, la ville vivait au rythme du textile dont elle tirait une renommée. Certaines entreprises telles que Gonfreville fournissait la majorité des emplois salariés de la ville de Bouaké. De plus de 3.000 employés, aujourd'hui elle emploie à peine 300 personnes [19].

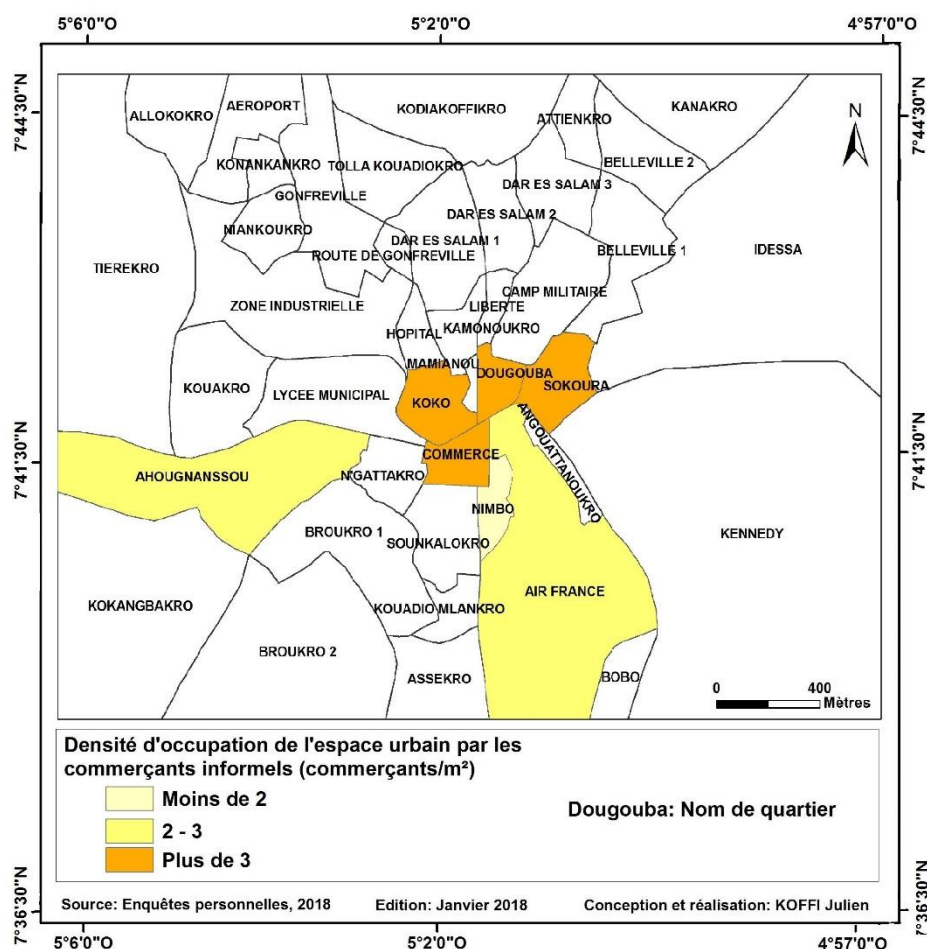


Fig. 3. Aperçu de la densité du commerce informel dans la ville de Bouaké

Ces activités informelles sont menées aux dépens du domaine public. L'occupation du domaine public (ODP) est un problème récurrent dans les villes africaines. À Bouaké, les Autorités sont contraintes de tolérer cette pratique puisque le marché central détruit en 1998 n'a jamais été reconstruit. La Municipalité alimente également ce phénomène en tolérant ou en procédant elle-même à la construction provisoire de boutiques sur ce domaine. L'ODP concerne tous les types de commerce: les magasins y font déborder des extensions, les commerçants y déploient des étals pour la journée, les propriétaires y entreposent des matériaux de construction. Cette occupation est néanmoins source de revenus pour la Mairie puisqu'elle y perçoit certaines taxes [17].

3.1.2 LE COMMERCE INFORMEL COMME UN AUTRE FACTEUR DE PRODUCTION DES ORDURES

Le manque de sites dédiés pour la pratique du commerce rendent les habitants inintelligents avec un mode de vie inintelligent par la production de déchets. L'esthétique urbaine de la ville de Bouaké est fortement mise en mal par l'omniprésence de déchets. Cette omniprésence des ordures est due à la présence des commerçants installés illégalement sur les trottoirs. Cette insalubrité est plus accentuée dans les quartiers de Dougouba et de Commerce. La photo 1 montre un canal d'évacuation des eaux bouché par les ordures. Ces ordures sont constituées de sachets plastiques utilisés pour les emballages ou des résidus issus des produits vendus par les commerçants. En outre, le site du marché central (voir photo 2) est utilisé comme dépôt pour les ordures générées par ces activités. Cette même observation a été faite au marché d'Air France 2 à la différence qu'un bac à ordures y est installé.



Photo 1: Obstruction des canaux d'évacuation des eaux par les ordures au quartier commerce



Photo 2: Site du Marché central transformé en dépôt d'ordures en plein centre-ville

Source: Auteurs, 2018.

3.1.3 LA VILLE DE BOUAKÉ EST EN MARGE DE LA VILLE DURABLE: UNE DISPARITION REMARQUABLE DES JARDINS PUBLICS ET/OU DES ESPACES VERTS

La ville de Bouaké connaît un recul inquiétant des jardins publics ou des espaces verts d'où l'existence d'un environnement inintelligent. Au cours de nos enquêtes, les autorités municipales ont affirmé que lors de la conduite d'une opération de lotissement 5 % de cet espace doit être réservé pour un aménagement en espace vert. Aujourd'hui, sur une quarantaine de quartiers que compte la ville de Bouaké, nous avons quatre quartiers lotis avec des espaces verts pour une superficie de 75,5 habitats/km². Seulement, six espaces verts ont été aménagés et deux espaces verts y figurent comme site entretenu actuellement (voir le tableau 1). Les espaces verts entretenus sont le jardin de la SICOGLI et celui de la douane au Commerce. Cependant, ces jardins sont confrontés à plusieurs problèmes qui empiètent sur leur intelligence. Ces problèmes sont: absence d'éclairage public, entretien occasionnel surtout pendant la fête nationale, absence de système d'arrosage, pas d'aire de jeu et de repos, pauvreté floristique, insécurité, manque de toilettes, pas de poubelle, insuffisance de sièges, etc. En outre, les cinq personnes affectées par la Mairie pour l'entretien de ces espaces n'ont pas la qualification requise d'une part et manque de matériel pour effectuer le travail d'autres part.

Tableau 1. Aperçu des espaces verts de la ville Bouaké

Quartiers	Nom de l'espace vert	Surface m ²	Crée avant 1964	Crée depuis 1964	Etat actuel
Commerce	Jardin de la SICOI	3573	Oui	-	Entretenu
Commerce	Jardin de la Douane	3752	Oui	-	Entretenu
Commerce	Jardin de l'ex. COB	Environ 1500	Oui	-	Spolié
Air France	Jardin saint Martin	4737	Oui	-	Délabré
Air France	Jardin Konan Lambert		Oui	-	Abandonné
Kennedy	Complexe, parc zoologique piscine municipale et pépinière	457,67	-	Oui	Abandonné
Sokoura	Face à la gare de M'Bahiakro	Non défini	-	Oui	Occupé par les activités de commerce informelles

Source: Mairie de Bouaké et MCLAU, 2015.

L'espace vert de l'ex. COB est le plus vaste espace vert de Bouaké avec une superficie d'environ 1500 m². Cet espace abritait des espèces ligneuses telles qu'*acacia spp*, *trema guinenis*, etc. Les populations bénéficiaient de l'ombrage de ces arbres. Cependant, la crise militaro-politique a conduit à l'abandon de cet espace car les autorités étatiques ont déserté la ville. Alors, le couvert végétal a été détruit pour leur usage en bois de chauffe et en champ. De plus, l'insécurité règne dans cette zone. Face à cette situation, cet espace a été spolié à la ville pour cause d'utilité publique pour la construction de l'agence de la Banque Centrale des États de l'Afrique de l'Ouest (BCEAO). Il faut rappeler que l'agence de la BCEAO de Bouaké a été détruite pendant la crise militaro politique. La photo 4 montre la nouvelle agence de la BCEAO construite sur l'espace vert de l'ex. COB.

L'espace vert Saint-Martin était délabré avant son occupation actuelle par le marché d'Air France 2. Depuis 2015, le Conseil Municipal a initié un projet de construction de marché dans les quartiers d'Ahounansou et d'Air France 2. Le marché d'Ahounansou est en construction. Cependant, celui d'Air France 2 est en projet. Ainsi, les commerçants occupent provisoirement l'espace vert. La photo 3 illustre l'occupation de cet espace et l'occupation de la chaussée par le commerce informel. Cette occupation obstrue cette voie. Cette situation est plus désagréable les mardis (jour de marché).



Photo 3: Marché Air France 2 occupant l'espace vert Saint Martin



Photo 4: Nouvelle cité de la BCEAO construit sur le jardin public de l'ex. COB

Source: Auteurs, 2018.

Dans la ville informelle, il n'y a pas de production/offre de services publics ou de zones à vocation spéciale et l'activité économique se déroule en plein air. Mais l'homme a besoin continuellement de nouveaux espaces pour sa survie et il exploite les diverses possibilités que lui offre le milieu où il vit [5]. Cette observation va de pair avec celle constatée à Sokoura et à Air France 2. L'espace vert ou de repos de Sokoura tout comme celui de Saint-Martin sont envahis par les commerçants exerçant dans l'informel. L'incendie du marché central de Bouaké en 1998 a conduit les commerçants à s'installer sur ce site.

3.1.4 LA FRACTURE NUMERIQUE: UN INDICATEUR ÉMERGENT DANS L'AVENEMENT DE BOUAKE EN UNE VILLE INTELLIGENTE

La diffusion contemporaine de l'information à Bouaké a débuté en 1904 avec l'ouverture d'un bureau de Poste Télégraphe et Téléphone (PTT) [20]. Cette innovation a consolidé les relations intimes entre la localité et son arrière-pays. Aujourd'hui, elle bénéficie de la technologie mobile de quatrième génération. Cependant, la ville de Bouaké est handicapée par la persistance des zones grises. Une présence limitée des technologies 3 G et WiMax du fournisseur MTN à Bouaké. En effet, sur la trentaine de quartiers qui composent la ville de Bouaké, seuls 8 abritent la technologie 3 G et 6 par le WiMax. La lecture spatiale des sites d'implantation des technologies montre que les critères qui président le choix de leur déploiement sont respectivement la taille de la population et le statut du quartier. En effet, les quartiers tels qu'Air-France, Belleville, Broukro, Dar-Es-Salam, Sokoura et Zone qui sont des zones marquées par la présence des technologies 3 G et WiMax [21] ont une taille de population supérieure à 30 000 habitants [1]. Quant aux quartiers Commerce, Kennedy et Municipal, l'implantation des technologies émane de leur statut de centre des affaires de la ville pour le Commerce et d'habitat de hauts standings pour les deux autres. Bien que le quartier Koko ait une taille de population supérieure à 30 000 habitants, il n'est pas une zone d'implantation technologique. Toutefois, sa proximité au quartier Commerce lui permet de bénéficier des mêmes commodités que ce quartier. À partir de ces différentes situations, il ressort que la diffusion spatiale des technologies à Bouaké par le fournisseur d'accès MTN tient compte des critères densité de la population et intérêt économique des quartiers par rapport à une logique de marché.

La situation de l'Internet est encore plus critique. Bien que la norme 3G se généralise un peu plus aujourd'hui dans l'espace géographique de la ville de Bouaké, il n'est cependant pas convenablement accessible partout dans la ville. Les zones un peu à l'écart du centre-ville ne réceptionnent pas encore correctement le signal [22].

3.1.5 L'AMENAGEMENT NUMERIQUE: UNE EXIGENCE POUR L'AVENEMENT DE L'INTELLIGENCE TERRITORIALE

L'aménagement numérique constitue le fondement de l'intelligence territoriale. En 2000, la Côte d'Ivoire met en place son plan de développement de l'infrastructure nationale de l'information et de la communication 2000-2005. Les auteurs de ce plan suggèrent que le déploiement des TIC devrait se faire très rapidement pour éviter que les technologies soient obsolètes d'une part, et d'autre part pour permettre une vulgarisation de la « culture Internet » [23]. Ce rapport met l'accent sur le déploiement des TIC. Le rapport insiste sur la diffusion des infrastructures de télécommunications sur tout le territoire national. Cette diffusion infrastructurelle doit s'effectuer pendant une durée de trois ans. La première année d'équipement concerne les grandes localités du pays telles que: Abidjan, Yamoussoukro, Bouaké, Daloa et San Pedro [23]. Les villes moyennes et les petites villes seront équipées successivement la deuxième et la troisième année. Les infrastructures inter et intra urbaines retenus sont la fibre optique et les faisceaux hertziens.

La mise en place de ces infrastructures de télécommunication a connu un ralentissement à cause de la crise militaro-politique. Néanmoins, le câblage de la Côte d'Ivoire a repris sa course depuis juillet 2012. Ces travaux sont menés par les différents opérateurs de télécommunications (Orange et Côte d'Ivoire Télécom, Moov et MTN) et l'État. L'État est représenté ici par l'Agence Nationale du Service Universel des Télécommunications (ANSUT/TIC). Les photos 5 et 6 montrent des travaux d'ingénierie dans la ville de Bouaké avec l'ANSUT/TIC comme maître d'œuvre.



Photo 5: Enseigne montrant les travaux de construction du backbone national à Bouaké



Photo 6: Creuset pour l'enfouissement de la fibre optique dans la ville de Bouaké

Source: Auteurs, 2018.

Sur la photo 5, des dispositions ont été prises pour avertir les usagers de la conduite du déploiement de la fibre optique à Ahougnansou (axe Bouké-Béoumi). Quant à la photo 6, elle montre des creusets pour l'enfouissement de la fibre optique au Commerce (axe Commerce-Zone industrielle).

3.2 LES STRATEGIES POUR LA MUTATION DE BOUAKE EN UNE VILLE INTELLIGENTE ET DURABLE

3.2.1 LA VILLE DE BOUAKE ET LE CYCLE DE CREATION D'UNE INTELLIGENTE ET DURABLE

La construction d'une ville intelligente et durable obéit à un cycle comme l'illustre la figure 4. Selon cette figure, six étapes doivent être respectées. Dans sa stratégie de développement local de 2014-2016, la Commune de Bouaké met l'accent sur les points suivants: la digitalisation des services, la réhabilitation et la construction des infrastructures socioéconomiques, et la conduite d'étude.

Dans le processus de reconquête de son lustre d'antan, la Commune de Bouaké mise sur la digitalisation de ses différents services. Cette digitalisation des services vise à l'amélioration de la qualité du service et facilité la gouvernance intelligente. Ces actions reposent essentiellement sur l'acquisition de matériel de reprographie pour la direction des services municipaux, l'acquisition du matériel informatique pour le cabinet et les services municipaux, et l'acquisition de logiciels informatiques pour l'état civil et la direction financière. Cette innovation est interne à la Mairie.

Les infrastructures socioéconomiques de la ville de Bouaké ont subi de plein fouet les affres de la crise militaro-politique. Elles ont été victimes de vandalisme ou de manque d'entretien. Alors, la Commune de Bouaké (2014) a décidé de réhabiliter ou de construire des infrastructures socioéconomiques notamment des écoles, des centres de santé, des routes, etc. La domotique n'est pas intégrée dans la construction de ces infrastructures.

Le Conseil Municipal a diligenté des études en vue de redynamiser la ville de Bouaké. Ces études sont celle de la reconstruction du Grand Marché et de la construction de la piscine municipale. Pour l'instant, la réalisation d'un schéma stratégique d'aménagement numérique et d'un plan pour la création d'une ville intelligente et durable n'est pas l'ordre du jour.

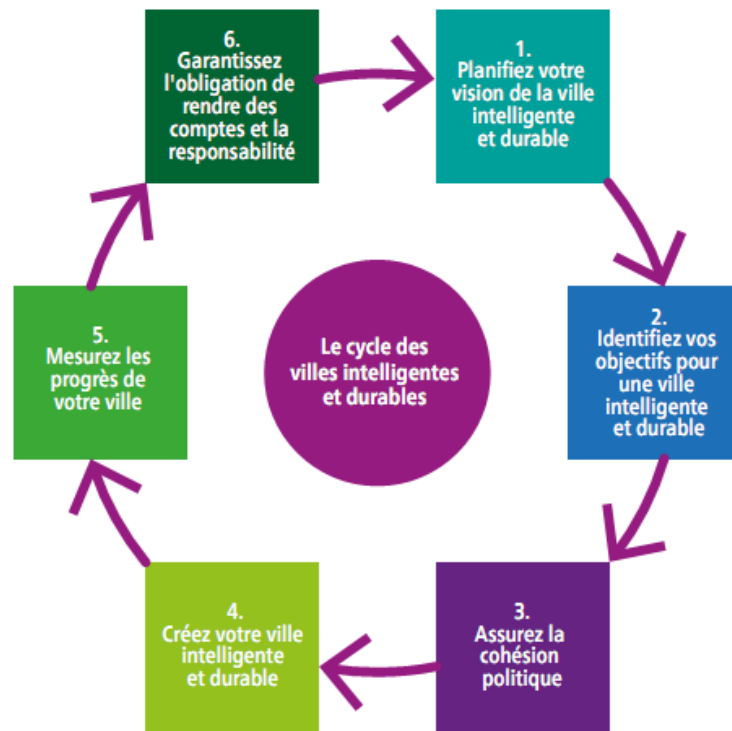


Fig. 4. Cycle de mutation en ville intelligente et durable

Source: UIT, 2016

Au total, la ville de Bouaké n'a pas encore entamée sa mutation en ville intelligente et durable. Le premier niveau du cycle des villes intelligentes et durables n'est pas encore entamé.

3.2.2 QUELQUES PISTES DE REFLEXIONS POUR FACILITER LA MUTATION DE LA VILLE DE BOUAKE EN VILLE INTELLIGENTE ET DURABLE

La globalisation doit influencer les orientations de politiques de développement des autorités locales. Il est nécessaire de sensibiliser les autorités locales à revoir la gouvernance de la ville à l'ère du digital. Cette sensibilisation doit commencer par la réorganisation du commerce informel. Les autorités doivent songer à trouver un site pour ces commerçants afin de rendre fluide la circulation par endroits. Puis, l'établissement d'un programme stratégique de ville durable devrait permettre de réduire de la fracture électrique, de faire la promotion des énergies renouvelables, d'avoir un comportement citoyen smart vis-à-vis de l'environnement, la réduction du fossé numérique.

Le développement d'une localité s'appuie sur l'accumulation d'acquis. Cet acquis est transmis aux générations futures dans l'espoir que celui-ci sera amélioré et que la chaîne de transmission ne soit pas interrompue. Cependant, la destruction des infrastructures socioéconomiques de base à Bouaké pendant la crise militaro-politique met la ville à la traine. Donc, des politiques de sensibilisations les populations sur la protection des acquis et des mesures coercitives doivent appliquées dans la rigueur de la loi. Cette posture permettrait de réduire ou de proscrire le vandalisme des infrastructures.

4 CONCLUSION

Divers facteurs permettent de mettre en évidence l'inintelligence actuelle de la ville de Bouaké. Au niveau structurel, le commerce informel est l'un des facteurs réducteurs dans la mutation de Bouaké en une ville intelligente et durable. Il faut souligner que le commerce informel est la résultante de certaines circonstances imputables à la puissance publique et à un contexte économique mondiale délétère. En outre, la persistance de la fracture numérique entre les différents quartiers de la ville ne facilite pas une appropriation du numérique. En un mot, plusieurs critères restent satisfaire afin que la ville de Bouaké soit une ville intelligente et durable.

REFERENCES

- [1] Institut National de la Statistique, Recensement Général de la Population et de l'Habitat 2014, 2014 p.
- [2] Institut National de la Statistique, Enquêtes sur le niveau de vie des ménages en Côte d'Ivoire (ENV 2015), Abidjan, 2015.
- [3] H. EHRHART Hélène, «Les enjeux de la nouvelle croissance ivoirienne», *Macroéconomie & Développement*, N°20, 28 p, 2015.
- [4] AGENCE D'ÉTUDES ET DE PROMOTION DE L'EMPLOI, *Le secteur informel à Abidjan en 2008*, Abidjan, Observatoire de l'Emploi, des Métiers et de la Formation, 2009.
- [5] M. T. CUONZO, «Les petits métiers: le secteur de l'économie informelle en Afrique», *Local resources and global trades: Environments and agriculture in the Mediterranean region*, pp. 271-276, 2003.
- [6] Union Internationale des Télécommunications, *Construire les villes intelligentes et durables de demain*, UIT, N°2, 2016.
- [7] A. SEKRE-GBODJE Alphon, Évolution économique de Bouaké, de l'économie précoloniale à l'économie coloniale de marche: 1858-1939, Abidjan, Université de Cocody, 2005.
- [8] Nations Unies, *Infrastructures et villes intelligentes*, Genève, Conseil économique et social, 2016.
- [9] R. LAUGIER Robert, La ville de demain: intelligente, résiliente, frugale, post-carbone ou autre, Paris, Centre de Ressources Documentaires, 2013.
- [10] Nations Unies, 1987, *Notre avenir à tous*, New York, 349 p.
- [11] J. VULBEAU, «Les villes dans la nébuleuse des réseaux verts», *Territoires*, pp. 10-13, 2010.
- [12] HERAN, Frédéric, «La ville durable, nouveau modèle urbain ou changement de paradigme ?», *Métropolitiques*, 2015. [Online] Available: <http://www.metropolitiques.eu/La-ville-durable-nouveau-modele.html>. (15 janvier 2018).
- [13] A. A. MBAYE, Secteur informel, emplois et transformation structurelle, 2014.
- [14] Institut National de la Statistique, Le secteur informel dans l'agglomération d'Abidjan: performances, insertion, perspectives, Abidjan, 2005.
- [15] S.V. SETHURAMAN, «Le secteur urbain non structuré: concept, mesure et action», *Revue Internationale du Travail*, vol. 116, no 5, B.I.T., Genève, 1976.
- [16] F. A. BAUMAN et J. KAYSER, Étude interrégionale la formation professionnelle dans le secteur informel: Côte d'Ivoire, Benin, Brésil, Maroc, Honduras, Guatemala, 2012.
- [17] Conseil Régional du Gbêkê, Programme triennal de la Région de Gbêkê 2016-2017-2018, Bouaké, 2016. 3.
- [18] Commune de Bouaké, *Programme Triennal 2014-2016*, Bouaké, Commune de Bouaké, 2014.
- [19] Chambre de Commerce et de l'Industrie, La situation de l'emploi à Bouaké, Bouaké, Chambre de Commerce et d'Industrie, Bouaké, 2016.
- [20] M. T. CUONZO, 2003, «Les petits métiers: le secteur de l'économie informelle en Afrique», *the Mediterranean region*, pp. 271-276, 2003.
- [21] K. G. AMOATTA, *L'aménagement numérique de la région de Gbêkê et ses implications socio-économiques*, Thèse de Doctorat, Université Alassane Ouattara, Bouaké, Côte d'Ivoire, 2018.
- [22] A. F. LOUKOU, «Geographical study of the problematic of « gray areas » electronic communications in the city of Bouaké», *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 15, no. 1, pp. 130-140, March 2016.
- [23] K. G. AMOATTA, «Le projet « un citoyen, un ordinateur, une connexion internet »: un exemple de réduction de la fracture numérique dans la région de Gbêkê (Côte d'Ivoire)», *Germivoire*, n° Spécial 7, pp. 30-49, 2017.

Potentiel du basilic, du sorgho et du maïs comme plantes de service dans la gestion des insectes défoliateurs du Moringa au Niger

[Potential of basil, sorghum and maize as service plants in the management of Moringa defoliating insects in Niger]

Akonde Zinsou François-Xavier¹, Zakari Moussa Ousmane², and Iro Dan Guimbo²

¹Laboratoire de Zoologie agricole, Centre Régional Agrhymet, BP11011 Niamey, Niger

²Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger

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 Niger, moringa leaf production keeps market gardeners busy in most urban and peri-urban areas. The economic importance of moringa is well established, given the area planted, its virtues and its contribution to nutritional security and poverty reduction. However, in recent years, moringa productivity has fallen considerably due to the almost constant pressure of defoliating insects. Faced with this situation, growers are using unregistered chemicals of dubious origin, often hazardous to human health and the environment. This study aims to find alternative methods to chemical control, in particular by promoting agroecological management. The study was conducted in a Fisher block design with four (4) replications and four (4) treatments, where the potential of basil, sorghum and maize in the management of moringa defoliating insects was tested. Insect abundances and diversity indices were calculated and compared between treatments. Defoliation levels were determined by treatment. Analysis of the results showed that basil and sorghum reduced insect abundance by 7% and 5% respectively, and increased insect diversity by 8% and 13% respectively with the presence of natural enemies in the plots. Similarly, the results revealed the potential of basil and sorghum to very significantly ($P = 0.0015$) reduce defoliation by 36% and 34% respectively in moringa plots. Sorghum and basil may be better candidates for inclusion in the agroecological management of moringa defoliating insects.

KEYWORDS: Moringa, basil, sorghum, maize, management, defoliator, Niger.

RESUME: Au Niger, la production de moringa feuille est une activité qui occupe les maraîchers dans la plupart des zones urbaines et péri-urbaines. L'importance économique du moringa n'est plus à démontrer eu égard aux superficies emblavées, à ses vertus, sa contribution à la sécurité nutritionnelle ainsi qu'à la lutte contre la pauvreté. Ces dernières années il a été constaté une baisse considérable de la productivité du moringa liée à la pression quasi permanente des insectes défoliateurs. Face à cette situation, les producteurs utilisent des produits chimiques d'origine douteuse non homologuée le plus souvent dangereux pour la santé humaine et l'environnement. La présente étude vise des méthodes alternatives à la lutte chimique notamment la promotion de la gestion agroécologique. L'étude a été conduite dans un dispositif en blocs de Fisher avec quatre (4) répétitions et quatre (4) traitements où le potentiel du basilic, du sorgho et du maïs dans la gestion des insectes défoliateurs du moringa a été testé. Les abondances et les indices de diversité des insectes ont été calculés et comparés entre les traitements. Les niveaux de défoliation ont été déterminés selon les traitements. L'analyse des résultats obtenus ont montré que le basilic et le sorgho ont permis de réduire l'abondance des insectes respectivement de 7% et 5% et accroître leur diversité respectivement de 8% et 13% avec la présence des ennemis naturels dans les parcelles. De même, les résultats ont révélé le potentiel du basilic et du sorgho à réduire très significativement ($P = 0,0015$) la défoliation respectivement de 36% et 34% dans les parcelles du moringa. Le sorgho et le basilic peuvent être des meilleurs candidats à intégrer dans la gestion agroécologique des insectes défoliateurs du moringa.

MOTS-CLEFS: Moringa, basilic, sorgho, maïs, gestion, défoliateur, Niger.

1 INTRODUCTION

Moringa oleifera Lam., 1785 est une espèce originaire des régions d'Agra et d'Oudh, au Nord-Est de l'Inde, cultivée aujourd'hui dans toutes les régions tropicales et subtropicales du monde [1] et reconnu comme un excellent complément alimentaire [2]. En dehors de ses vertus thérapeutiques, le moringa est hautement nutritif et une importante source de revenus. Dans le sahel, il constitue une filière prometteuse d'avenir où les demandes sur les marchés sahéliers ne sont pas comblées par la seule production nationale et on assiste encore à des importations de moringa feuilles. Il offre dans la sous-région des opportunités pour l'autonomisation socioéconomique et intéresse de plus en plus un nombre grandissant de producteurs qui s'orientent vers sa production. Au Niger, il est cultivé pour ses feuilles consommées sous différentes formes par environ 60 % de nigériens chaque jour. Il est produit en culture classique et sous irrigation dans les sites maraichers en pur ou en association avec les cultures maraichères. Cultivé dans toutes les régions sur 8072 ha au total, la chaîne de valeur mobilise près de 42000 emplois en plein temps /an. Elle représente un PIB de 84,6 milliards / an. La plante de moringa, jadis négligée, est désormais considérée comme une nouvelle ressource alimentaire et économique [3].

Cependant, les plantations de moringa au sahel sont sujettes non seulement aux aléas pédoclimatiques mais surtout aux attaques des bioagresseurs. Les rendements en biomasse foliaire sont insuffisants en quantité et en qualité et ne permettent pas de satisfaire les besoins du marché [4]. En effet, la mauvaise répartition et l'irrégularité des pluies, les longues périodes sèches et chaudes, la dégradation croissante des terres constituent tant d'obstacles au développement de la filière moringa dans le sahel en général et au Niger en particulier [5]. Lors de l'étude portée sur la perception paysanne des risques agro-climatique de l'agriculture au Niger, il a été prouvé que les impacts immédiats de la forte variabilité intra et interannuelle sont les pertes de semis et de récoltes et le développement des ravageurs de cultures [6]. A cela, s'ajoutent les problèmes récurrents des bioagresseurs qui interfèrent à la croissance de la plante et réduisent voire anéantissent sa production. Les travaux de [4] ont révélé une dominance de *Noorda blitealis* et de *Zonocerus variegatus* comme principaux défoliateurs dans les champs de Moringa. [7] ont identifié trois espèces de lépidoptère (*Euproctis pasteopa*, *Noorda blitealis*, *Scoliopteryx libatrix*) lors de l'étude d'inventaire des ravageurs défoliateurs du moringa. Le taux de défoliation occasionné par ces insectes, était estimé par ces mêmes auteurs à plus 50%. Les dégâts causés par *Noorda blitealis* dans les champs de moringa ont été plus sévères en saison sèche qu'en saison des pluies [8]. Au cours de ses travaux de recherche sur la production du moringa, [9] a recensé les chenilles, les sauterelles et les termites comme les ravageurs majeurs de la plante. En effet, ces nuisibles mangent des parties de la plante, entraînant la destruction de feuilles, bourgeons, fleurs, fruits ou graines ainsi que l'interruption du flux de la sève. Les dégâts parfois spectaculaires, anéantissent les efforts des producteurs et constituent un frein pour l'essor de la filière.

Pour contrer ces ravageurs, les producteurs font recours à des méthodes chimiques et utilisent des pesticides de synthèse peut-être à large spectre et plus efficaces mais certainement nocifs à l'homme et à son environnement. Il a été démontré que la population rurale du Québec a été contaminée par les pesticides employés en agriculture, après consommation des produits agricoles [10]. [11] a démontré l'énorme risque environnemental et sanitaire que représente l'emploi des pesticides dans les jardins potagers. Ce risque d'intoxication et de pollution serait encore plus avéré avec la consommation des légumes frais comme les feuilles de moringa ayant reçu ces pesticides. Au Niger, les récentes études ont révélé l'emploi anarchique des pesticides en agriculture suivi des cas d'intoxications. [12] ont montré que 68 formulations de synthèse dont la plupart non homologuées ou interdites, sont utilisées sans aucune protection individuelle sur cinq (05) sites maraichers au Niger. L'emploi répété des pesticides de synthèse dans les plantations de moringa pourrait contribuer au développement de la résistance des insectes à ces molécules. [13] ont prouvé au Bénin et au Togo que les populations de *Plutella xylostella* et d'autres lépidoptères ont développée de résistance aux pyréthrinoides, organochlorés et organophosphorés. De même, une résistance élevée aux nombreuses classes chimiques de pesticides a été notifiée chez *Bemisia tabaci* en Afrique de l'Ouest [14]. Les pesticides ont également des effets néfastes sur la population des organismes utiles pour la protection des cultures. Il a été rapporté que les pesticides contenant du sulfoxaflor entraînent des pertes populationnelles chez les abeilles [15]. Selon [16], un autre gros problème que pose l'emploi des pesticides de synthèse est la gestion des emballages vides après usages et des pesticides obsolètes.

A l'issue de ces constats fâcheux liés à l'emploi des produits chimiques en agriculture, la FAO a instauré des directives qui orientent l'élaboration des politiques de gestion des ravageurs en associant la production agricole durable à la protection de l'environnement, à la santé humaine et à la sécurité sanitaire des aliments [17]. La gestion agroécologique des bioagresseurs est perçue de plus en plus comme une alternative à promouvoir pour une préservation durable des systèmes de production agricole [18]. Ainsi, la présente étude a essayé le potentiel du basilic, du sorgho et du maïs dans la gestion des insectes défoliateurs du moringa au Niger.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 ZONE D'ÉTUDE

L'essai a été conduit sur le site expérimental du Centre Régional Agrhymet de Niamey au Niger (Figure 1).

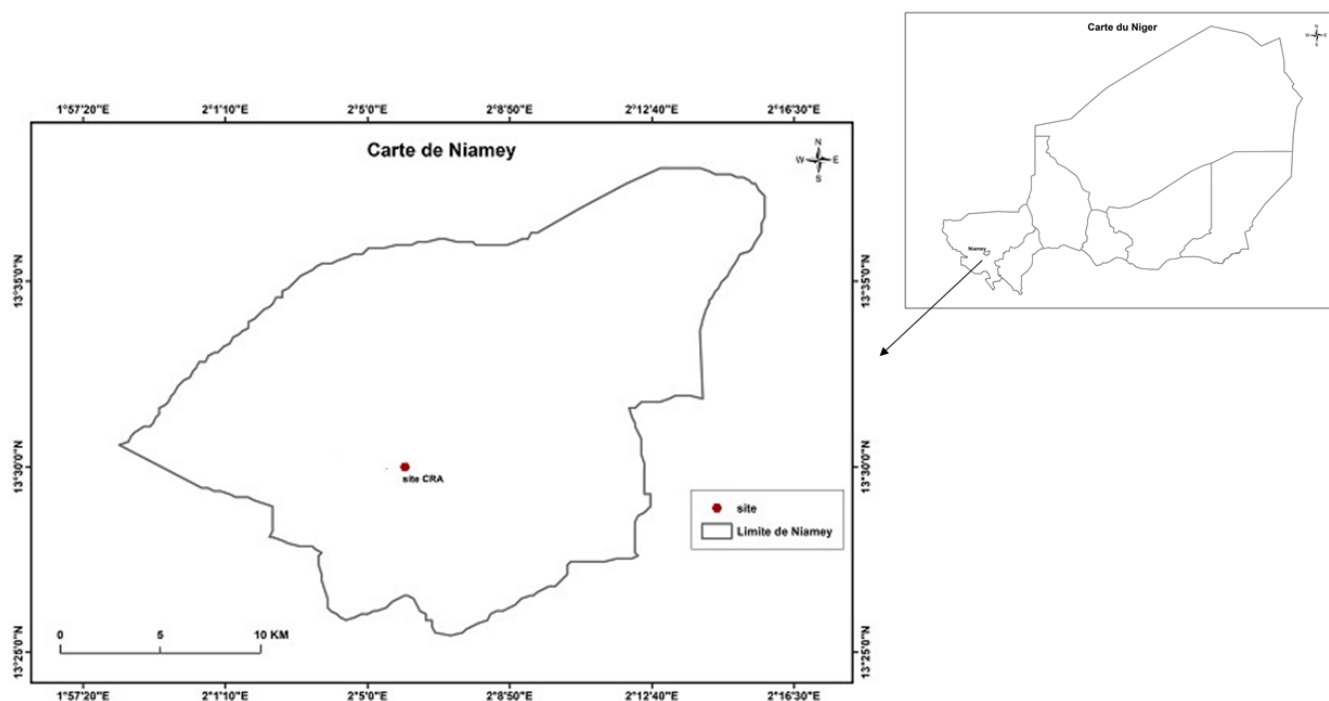


Fig. 1. Localisation du site expérimental

2.2 MATÉRIEL

2.2.1 MATÉRIEL VÉGÉTAL

Le matériel végétal ayant servi à la conduite de l'essai est constitué, du moringa, du sorgho, du maïs et du basilic:

✓ Moringa oleifera

La variété PKM1 (Periyakalum-1) choisie, a une croissance rapide et la première récolte a lieu environ 6 mois après l'installation de la culture. C'est une variété qui s'adapte mieux aux conditions africaines avec des rendements plus élevés que ceux de variété locale. Selon [19] PKM1 est sensible aux maladies et aux insectes.

✓ *Sorghum bicolor* (L.) Moench, 1794

Le choix est porté sur la variété de sorgho Sepon-82 de couleur blanc-crème et de panicule compact dont le poids de 1000 graines varie entre 12 et 20 grammes. C'est une variété dont la récolte intervient 90 jours après le semis. Elle a un rendement de 2 à 2,5 t/ha [20].

✓ *Zea mays* L., 1753

La variété de maïs P3 Kollo affectionne les sols de vallée et le sol dunaire riche en matière organique où il produit 5 à 7 tonnes de grains par ha au bout de 84-88 jours. La P3 Kollo possède un épi long avec des graines aplaties de couleur jaune vive.

✓ *Ocimum basilicum*

L'espèce choisie est une herbacée terrestre pérenne dont la taille atteindre 2 mètres de haut. Elle possède des feuilles simples, opposées, à limbe ovale, grossièrement dentelé, à base atténuée et décurrente.

Dans le cadre de cet essai le maïs, le sorgho et le basilic sont considérés comme plantes de services et le moringa comme culture principale

2.2.2 MATÉRIEL ANIMAL

Le matériel animal est constitué des insectes inventoriés sur le matériel végétal. Ils ont été capturés directement sur les plantes et indirectement par le piégeage. Ils sont composés de neuf (9) ordres d'insectes nuisibles et utiles.

2.3 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le dispositif expérimental d'une superficie de 2400 m² a été installé (figure2). Il s'agit d'un dispositif de bloc aléatoire complet composé de quatre traitements et quatre répétitions. Les blocs sont séparés d'une allée de 6 m et les parcelles élémentaires d'une superficie de 60 m² d'une allée de 3 m.

Les traitements sont:

- T0 = parcelle témoin avec culture de moringa pure
- T1= parcelle de moringa avec plants de basilic en intercalaires
- T2 = parcelle de moringa avec maïs en bordure
- T3 = parcelle de moringa avec sorgho en bordure

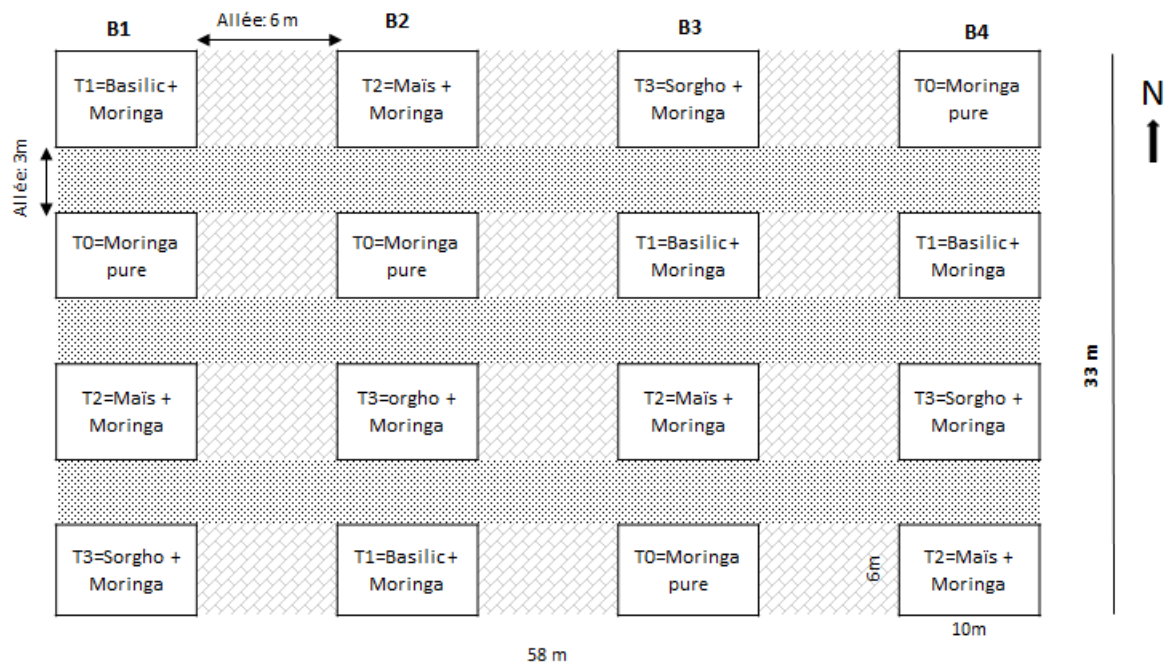


Fig. 2. Schéma du dispositif expérimental

2.4 MÉTHODOLOGIE

2.4.1 INSTALLATION DE L'ESSAI

A l'aide d'un motoculteur, le labour a été fait à une profondeur de 30 cm. Il s'en est suivi de l'apport de la bouse de vache (matière organique) en fumure de fond à raison de 30 kg par parcelle. Dix jours avant la transplantation des plants de moringa, les plantes de services ont été mises en place. Le maïs et le sorgho ont été semés à 2 graines par poquet en bande de deux lignes sur les deux longueurs de chaque parcelle élémentaire concernée. L'écartement entre les deux lignes de la bande est de 30 cm et entre les poquets 50 cm. Les plants de basilic de 45 jours d'âge ont été transplantés de sorte qu'ils soient en intercalaire aux plants de moringa. En laissant 1 m de bordure sur la largeur, trois lignes de basilic séparées de 2 m, ont été mises en place dans chaque parcelle élémentaire concernée. Les poquets de basilic réalisés sur la longueur des parcelles ont été espacés de 1 m. Les plants de moringa de six semaines d'âge ont été transplantés dans toutes les parcelles en respectant les écartements de 2 m x 2 m. Dans les parcelles témoins et des traitements T1, il a été repiqué 24 plants de moringa sur 4 lignes de 6 poquets par parcelle. Par contre, dans les parcelles de traitements T2 et T3, il a été respecté un espacement de 1 m entre les plants de bordure et ceux de moringa, ce qui a abouti à 3 lignes de 6 poquets soit 18 plants par parcelle. Les entretiens ont été le sarclage tous les 21 jours, l'apport d'engrais de couverture avec de l'Urée à la micro-dose de 5 g par poquet 35 jours après semis.

2.4.2 COLLECTE DES DONNÉES

Les données collectées ont porté pour l'essentiel sur la population des insectes et les niveaux de dégâts (défoliation). Les données ont été collectées à une fréquence de sept (7) jours et durant cinq semaines.

2.4.2.1 PIÉGEAGE ET CAPTURE DES INSECTES

Pour apprécier la population et la composition des insectes dans chaque traitement, les pièges jaunes à eau ont été installés dans toutes les parcelles. Le piège jaune à eau est une méthode passive non sélective de capture des insectes. Il est basé sur le principe d'attraction par la couleur et le maintien des insectes par l'eau contenant un conservant. Au milieu de chaque parcelle, un piège a été installé et a permis de capturer les insectes au bout d'une semaine avant la collecte et le renouvellement de son contenu. Les insectes capturés ont été collectés par parcelle à l'aide d'une pince, d'un micro-passoire, d'un tissu tamis et transmis dans un tube contenant de l'alcool 70%. Sur chaque tube, il a été inscrit la date, la répétition et le traitement en indiquant une et une seule parcelle.

2.4.2.2 DÉNOMBREMENT ET IDENTIFICATION DES INSECTES

A l'aide de la loupe binoculaire, des pinces, des aiguilles entomologiques, des verreries et de la règle millimétrée au laboratoire de la zoologie agricole de l'AGRHYMET, les insectes collectés ont été manipulés, observés, dénombrés et identifiés par traitement. Grâce à la clé d'identification des insectes sur les plantes en Afrique tropicale, les insectes capturés ont été identifiés jusqu'au taxon famille. L'approche utilisée est basée sur l'observation des traits morphométriques des insectes au grossissement 40x du binoculaire Plan 1X Wild Heerbrugg et leur comparaison aux données du descripteur (clé) utilisé.

2.4.2.3 OBSERVATION DIRECTE DES PLANTS AU CHAMP

Elle a permis d'évaluer les niveaux de défoliation des plantes de moringa et voir s'il y a la présence éventuelle des larves défoliatrices qu'on pourrait échantillonner et identifier. Pour ce faire, 30% des plants de moringa dans chaque parcelle ont été évalués tout en laissant les plants de bordures. Dans les parcelles abritant les traitements T1 et T0, il a été fait un choix systématique aléatoire de 8 plantes et dans celles abritant T2 et T3 un choix de 6 plantes par parcelle de la même manière (figure 3). Une fois les plantes choisies, elles ont servi à évaluer la défoliation durant tout l'essai.

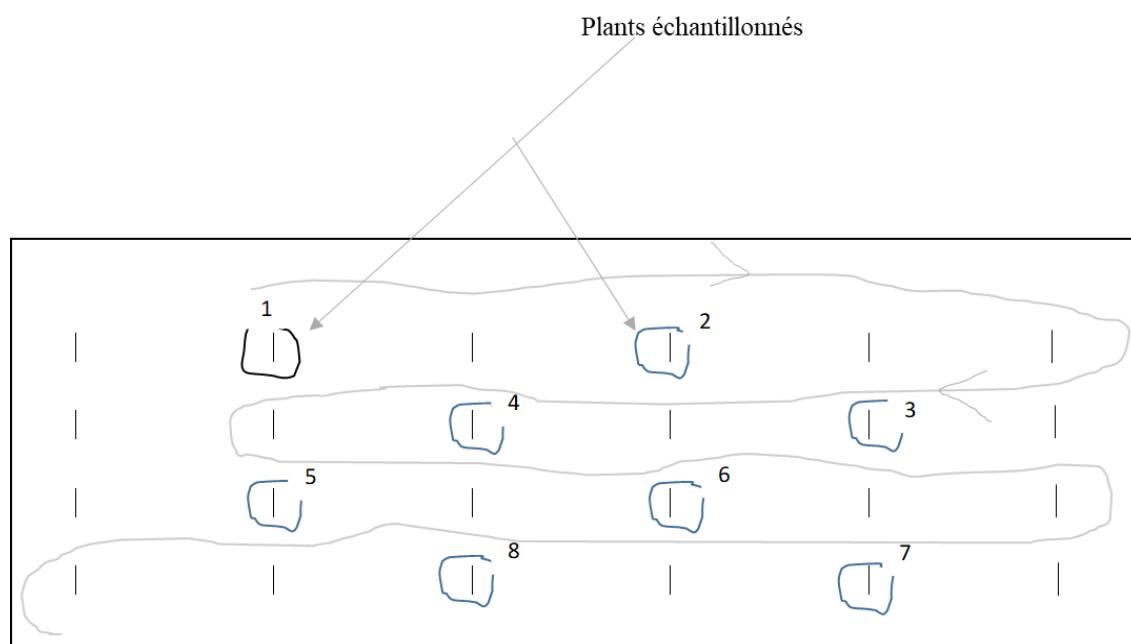


Fig. 3. Schéma d'échantillonnage systématique aléatoire dans une parcelle de traitement T0

Au champ, pour attribuer un score de défoliation aux plantes échantillonnées, l'échelle de notation suivante a été utilisée.

- 1 = 0 % de tissus végétaux consommés (pas d'attaque);
- 2 = 1 % à 15 % de tissus consommés (faible attaque);
- 3 = 16 % à 40 % de tissus consommés (attaque moyenne);
- 4 = 41 % à 80 % de tissus consommés (attaque importante);
- 5 = 81 % à 100 % de tissus consommés, ou le plant mort (attaque extrême).

2.4.3 PARAMÈTRES CALCULÉS

- Abondance (A) et Indice de la diversité (Id)

L'abondance (A) et l'indice de la diversité (Id) des insectes ont été calculés en adaptant la formule de [21]

$$A = \frac{ni \cdot 100}{\sum ni}, ni = \text{nombre moyen d'insectes dans chaque traitement},$$

$$Id = \frac{nf}{ni}, nf = \text{nombre de familles d'insectes par traitement}, ni = \text{nombre moyen d'insectes par traitement}$$

- Niveau moyen de défoliation

La sévérité moyenne (niveau moyen) de dégâts (Nmd) a été calculée par parcelle selon la formule:

$$Nmd = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i * Y_i)}{\sum_{i=1}^n X_i}$$

i = numéro du plant infesté (1, 2, 3, 4, 5,... n)

x_i = échelle attribuée au plant (1, 2, 3, 4, 5),

y_i = pourcentage moyen de dégâts correspondant (0%, 7.5%, 27.5%, 60%, 90%)

Les niveaux moyens de dégâts ont permis de reproduire graphiquement les aires sous la courbe de progression de défoliation dans les traitements.

2.5 ANALYSES DES DONNÉES

Les données collectées ont été traitées sur Fxcel 2013 qui a servi également au calcul de l'abondance et de l'indice de diversité des insectes. Les niveaux moyens de défoliation ont été soumis à l'analyse de variance grâce au logiciel R. La comparaison des moyennes et le classement des traitements ont été faits par le même logiciel.

3 RÉSULTATS

3.1 POPULATION DES INSECTES CAPTURÉS

Les pièges installés ont permis la capture de 2467 insectes pour la période allant du 09 août au 7 octobre 2023. Le plus grand nombre d'insectes (697) a été piégé au niveau du traitement T0 (témoin) et le plus petit nombre (550) au niveau du traitement T1. La figure 4 indique l'abondance sous forme de la proportion d'insectes obtenue dans chaque traitement.

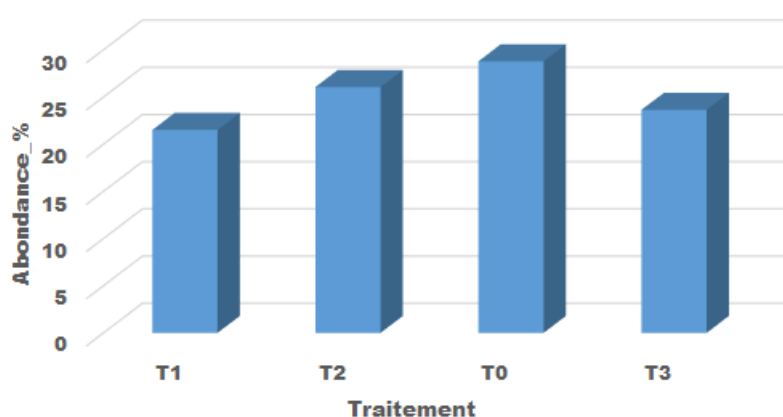


Fig. 4. Abondance des insectes selon le traitement

3.2 DIVERSITÉ DES INSECTES CAPTURÉS

L'identification des insectes a permis le dénombrement de vingt-deux (22) familles d'insectes dont six (6) familles utiles. La répartition des familles d'insectes obtenus par traitement est consignée dans le tableau 2:

Tableau 1. Nombre et composition des familles d'insectes capturés dans chaque traitement

Traitement	Ordre	Famille	Nombre de familles	Nombre de familles utiles
sorgho + moringa T3	Lépidoptère	Crambidae	13	4
	Hyménoptère	Formicidae		
		Apoïdae / Apidae*		
	Hémiptère	Aphididae		
	Hétéroptère	Pyrrhocoridae		
	Homoptère	Cicadellidae		
	Araneae	Arachnidae		
	Coléoptère	Coccinellidae*		
		Pyrochroïdae*		
		Melyridae / Malachiinae*		
	Orthoptère	Pyrgomorphidae		
		Acrididae / Gomphocerinae		
		Acrididae / Oedipodinae		
Basilic + moringa T1	Lépidoptère	Crambidae	11	4
	Homoptère	Cicadellidae		
	Orthoptère	Pyrgomorphidae		
		Acrididae / Gomphocerinae		
	Hyménoptère	Apoïdae / Apidae*		
		Formicidae		
	Diptère	Bibionidae*		
		Dolichopodidae*		
	Coléoptère	Chrysomelidae		
		Pyrochroïdae*		
Maïs + moringa T2	Hétéroptère	Miridae	12	2
	Lépidoptère	Crambidae		
	Hyménoptère	Apoïdae / Apidae*		
		Formicidae		
	Diptère	Anthomyiidae		
	Hémiptère	Aphididae		
	Orthoptère	Pyrgomorphidae		
		Acrididae / Gomphocerinae		
	Homoptère	Cicadellidae		
	Coléoptère	Chrysomelidae		
		Coccinellidae*		
Moringa pure T0	Hétéroptère	Pentatomidae	9	1
	Araneae	Arachnidae		
	Lépidoptère	Crambidae		
	Orthoptère	Pyrgomorphidae		
		Acrididae / Gomphocerinae		
	Hyménoptère	Formicidae		
	Homoptère	cicadellidae		
	Hémiptère	Aphididae		
Coléoptère	Araneae	Arachnidae	9	1
		Chrysomelidae		
		Coccinellidae*		

* = Organisme utile (prédateur, parasite, parasitoïde, pollinisateur, etc.)

Le plus petit nombre de familles d'insectes a été obtenu dans la culture pure de moringa (T0) avec une seule famille d'insectes utiles. Les grands nombres de familles d'insectes utiles (Coccinellidae, Pyrochroïdae, Malachiinae, Apidae) ont été trouvés dans les parcelles de traitements T1 et T3.

Le calcul d'indice de diversité des familles d'insectes dans chaque traitement a révélé le plus grand indice de diversité de familles (0,30) dans le traitement T3. Par contre le plus petit indice de diversité (0,17) est obtenu dans le traitement T0 (figure 5).

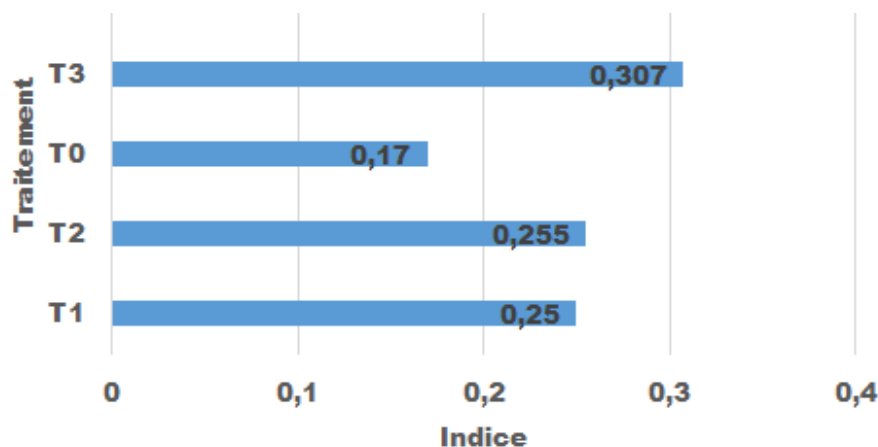


Fig. 5. Diversité de familles d'insectes selon les traitements

Comparativement au témoin T0, la diversité des familles d'insectes est accrue de 8% dans les traitements T1 et T2 et de 13% dans le traitement T3.

3.3 NIVEAU DE DEFOLIATION DU MORINGA SELON LES TRAITEMENTS

Le pourcentage moyen de défoliation le plus élevé a été obtenu dans les traitements T0 (parcelles de moringa pure).

3.3.1 EFFETS DES TRAITEMENTS SUR LA DEFOLIATION DU MORINGA

Le résultat d'analyse de variance des valeurs moyennes a révélé une différence d'effets très significative ($Pr = 0.00155$) entre les traitements (tableau 3). Les traitements ont eu un effet significatif sur la défoliation des plantes de moringa.

Tableau 2. Résultat d'analyse de variance

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)
Traitement	3	0.8604	0.28679	6.27	0.00155**
Residuals	36	1.6466	0.04574		

Codes de significativité: '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05

3.3.2 COMPARAISON DES TRAITEMENTS T1, T2 ET T3 AU TEMOIN T0

Le résultat d'analyse des données de défoliation a montré que les traitements T1, T2 et T3 ont été significativement différents du traitement témoin T0 (tableau 5). Ils ont permis de réduire significativement la défoliation des plants de moringa.

Tableau 3. Résultat du test de Dunnett

	Estimate	Std-Error	T value	Pr (> t)
T1 – T0	-19.478	4.91	-3.983	< 0.001***
T2 – T0	-14.554	4.91	-2.976	0.0144*
T3 – T0	-19.635	4.91	-4.015	< 0.001***

3.3.3 COMPARAISON DEUX À DEUX D'EFFETS DES TRAITEMENTS

Le résultat d'analyse des pourcentages moyens de défoliation a montré que les traitements T3 et T1 ont eu des effets similaires sans différence significative. Par contre T2 a eu un effet intermédiaire aux T1 et T3 (figure 6).

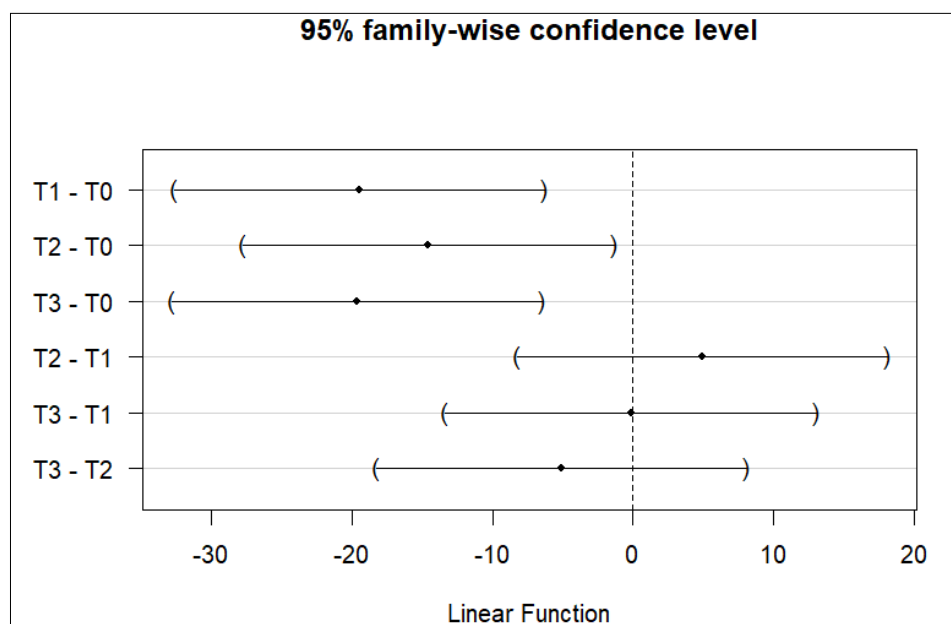


Fig. 6. Comparaison des effets de traitements entre eux pour la défoliation

Les segments ne touchant pas la projection verticale de zéro (0.0) indique une différence significative au seuil de risque $\alpha = 5\%$.

Le classement des moyennes a révélé trois groupes de traitements. Le groupe b, comportant les traitements T1 et T3 qui ont un effet significatif. Le groupe ab comportant T2 qui a un effet intermédiaire et le groupe a qui est le témoin (figure 8).

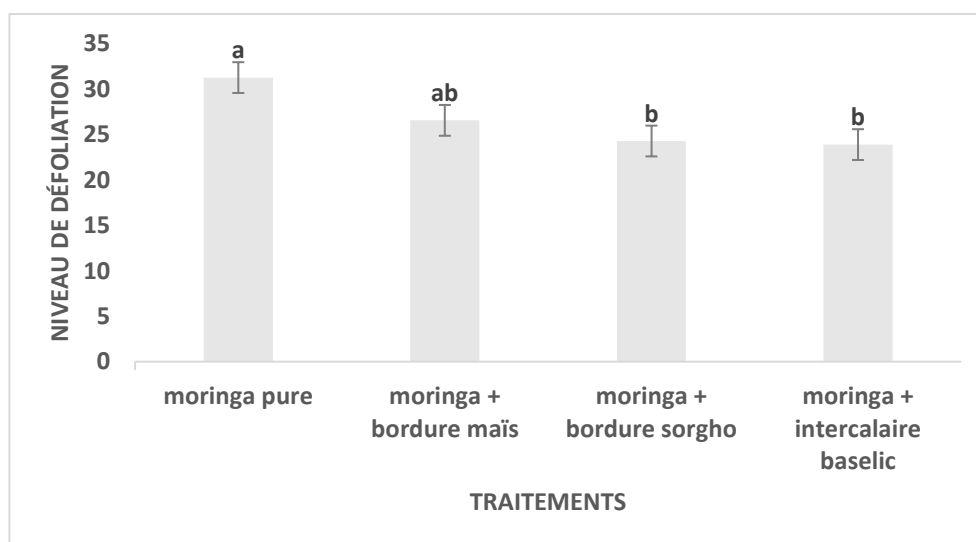


Fig. 7. Séparation des traitements par groupe d'effets sur la défoliation du moringa

Les niveaux moyens de défoliation (dans chaque traitement) portant la même lettre ne sont pas significativement différents au seuil de 5%.

3.3.4 EVOLUTION DANS LE TEMPS DES NIVEAUX DE DEFOLIATION DANS LES TRAITEMENTS

Durant la période de l'essai, les courbes de progression de défoliation ont présenté les mêmes allures pour les traitements (figure 8). N'empêche, les aires sous ces courbes ont révélé la plus grande surface défoliée dans le traitement T0 et la plus faible surface défoliée dans le traitement T1.

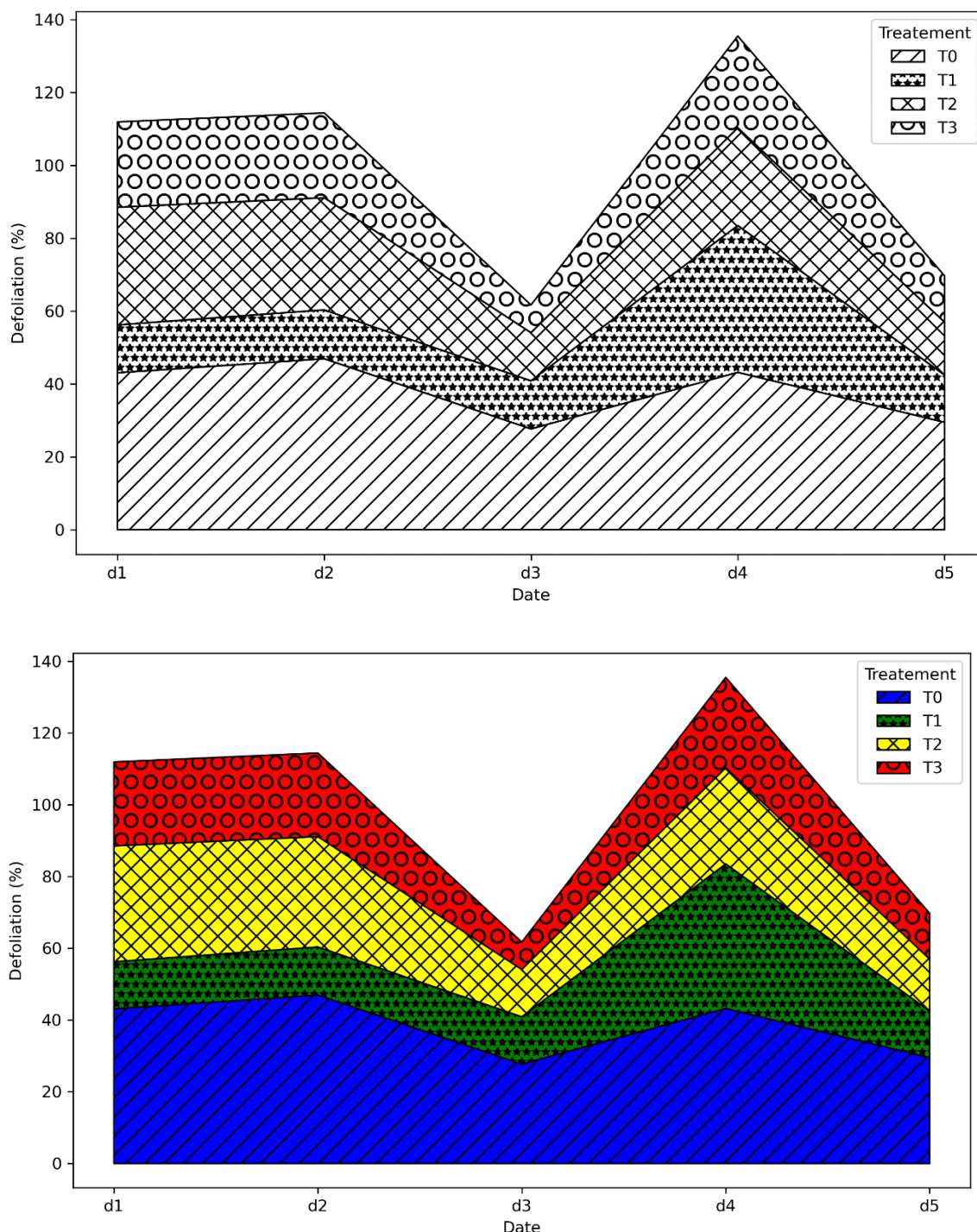


Fig. 8. Les aires sous les courbes de défoliation par traitement durant la période d'observation

4 DISCUSSION

4.1 EFFET DES PLANTES DE SERVICE SUR LA POPULATION ET LA DIVERSITÉ DES INSECTES

Les résultats de dénombrement des insectes capturés (cf tableau 1) ont montré que les plantes testées ont une influence sur la population des insectes. Elles ont permis de réduire l'abondance des insectes de 7% dans le traitement T1 (basilic + moringa) et de 5% dans le traitement T3 (sorgho + moringa) (figure 4). Le nombre et la composition des familles recensées ont varié d'un traitement à l'autre. Les parcelles ayant reçu l'association de plantes de service au moringa ont abrité les plus grands nombres de familles d'insectes (tableau 2). De même, les nombres les plus élevés de familles d'insectes utiles ont été obtenus dans les traitements T1 (basilic + moringa) et le traitement T3 (sorgho + moringa). Le même constat est fait pour les valeurs d'indice de la diversité où les résultats obtenus ont indiqué les plus grandes diversités d'insectes dans les traitements T1 (basilic + moringa), T2 (maïs + moringa) et T3 (sorgho + moringa). Ces plantes associées au moringa ont permis d'accroître la diversité des familles d'insectes de 8% dans les traitements T1 et T2 et de 13% dans le traitement T3 (figure 5).

Les résultats obtenus au cours de la présente étude, confirment notre première hypothèse et montrent que les plantes de services testés notamment le basilic et le sorgho ont eu un effet bénéfique dans la protection de la culture du moringa contre les insectes ravageurs des feuilles. Elles ont permis de réduire la population des ravageurs de moringa et favoriser la présence des ennemis naturels. Ce constat est plus perceptible dans les parcelles T1 (basilic + moringa) et T3 (sorgho + moringa) qui ont présenté peu de population d'insectes avec une forte proportion d'ennemis naturel et une grande diversité des familles. Le basilic, plante aromatique utilisée en intercalaire, elle aurait eu un effet répulsif sur les ravageurs notamment *Noorda blitealis* (défoliateur principal) de moringa tandis que le sorgho en bordure aurait servi d'écran (barrière) en empêchant les ravageurs d'être en contact direct avec les plants de moringa. Les plantes de services testées ont probablement de par leur position dans les parcelles, dû émettre des odeurs tout en détournant ou en désorientant les insectes ravageurs de moringa, qui n'ont pu détecter à travers leur système olfactif la présence des plantes de moringa. Les résultats de la présente étude corroborent ceux obtenus par certains chercheurs. Les travaux de A l'issu de l'étude sur les services écosystémiques de diverses plantes, [22] ont conclu que le basilic (*Ocimum basilicum*) utilisé couramment dans l'alimentation et à but médicinal, a également la vertu de repousser les insectes ravageurs des cultures et attirer divers ennemis naturels. En décalant la date de semis du basilic à celle des cultures légumières, on peut augmenter la population des ennemis naturels dans la zone des cultures avant même l'installation des ravageurs, ont-ils ajouté. De même, les résultats très prometteurs identiques à ceux de la présente étude, ont été trouvés lors de l'évaluation de l'impact de la plante aromatique basilic associé à la tomate sur les ravageurs et le développement de la tomate à Haïti [23]. Le basilic peut être donc utilisé au Niger dans la gestion agroécologie de la population des ravageurs défoliateurs de moringa.

Le basilic (*Ocimum basilicum*) est un légume feuille aromatique bien consommé en Afrique de l'Ouest pour ces valeurs nutritives et médicinales. Associer basilic à la culture de moringa (*Moringa oleifera*), pour la gestion des insectes défoliateurs de ce dernier, revêt de multiples intérêts alimentaires, économiques mais surtout agroécologiques. Cette originalité scientifique au sahel en général et au Niger en particulier, permettrait de répondre efficacement aux questions relatives à l'utilisation anarchique des pesticides sur le moringa, aux risques d'intoxications humaines, de la pollution des sols et des eaux, du développement de résistance des nuisibles, d'extinction des espèces mêmes utiles et de déséquilibre écologique. De plus, cette expérience conduite en conditions naturelles classiques est fort reproductible au niveau paysan sans grandes difficultés.

Les plantes installées en bordure de moringa notamment le sorgho (*sorghum bicolor*) ont significativement réduit la population d'insectes ravageurs sur les plantes du moringa par le principe de barrière spatiale ou stimulo-dissuasif mais ont également attiré les ennemis naturels (surtout en floraison) qui ont probablement régulé la dynamique des ravageurs. Ce résultat confirme la conclusion des chercheurs [24] qui ont rapporté que la séparation spatiale des plantes hôtes et non hôtes limite la diffusion des ravageurs, en cultures associées les plantes cultivées sont moins visibles et moins exposées qu'en cultures pures. Ces chercheurs ont ainsi essayé avec succès le sorgho en bordure du gombo contre la chenille carpophage (*Helicoverpa armigera*).

4.2 EFFETS DES PLANTES DE SERVICES SUR LES NIVEAUX DE DEFOLIATION

Le résultat d'analyse des données de défoliation a révélé une différence très significative ($Pr = 0.00155$) d'effets des traitements (tableau 4). En effet, les traitements T1 (basilic + moringa) et T3 (sorgho + moringa) ont diminué très significativement la défoliation du moringa par rapport au témoin. Le basilic en intercalaire et le sorgho en bordure ont permis de réduire respectivement de 36 % et 34% la défoliation et ce malgré la présence de *Noorda blitealis*, défoliateur principal du moringa, observé directement sur les feuilles de moringa dans toutes les parcelles.

Ces résultats qui confirment notre deuxième hypothèse de départ sont similaires à ceux obtenus par certains auteurs. A Belezma, les mêmes résultats ont été obtenus lors de l'essai du basilic contre la défoliation des essences forestières par la chenille processionnaire [25]. De même, contre la défoliation du chou, [26]) a rapporté les résultats similaires d'effets de basilic.

Plusieurs études scientifiques ont révélé les composés organiques volatiles du basilic (*Ocimum basilicum*) qui seraient à l'origine de la répulsion ou l'attraction de certains insectes. Ce qui pourrait justifier moins de populations de ravageurs défoliateurs et par conséquent des faibles niveaux de défoliation du moringa dans les parcelles où se trouvait le basilic. Aussi la présence d'ennemis naturels retrouvés dans les parcelles comportant le basilic pourrait être expliqué par le pouvoir attractif de ses composés organiques volatiles. Plusieurs autres plantes aromatiques possèdent ces substances et jouent le même rôle. C'est le cas de l'ail et l'oignon, en association avec les cultures maraîchère, qui ont repoussé efficace les insectes ravageurs [27]. Nombreuses études ont prouvé les propriétés répulsives et attractives des espèces du genre *Ocimum* en tant qu'une plante aromatique [28]; [29]; [30]; [31].

Le sorgho serait aussi une plante émettrice de composés volatiles (naphthalène, allylnalsole, eugenol, linalool, etc.,) qui attirent les insectes ravageurs en les détournant de leur plante hôte mais également les ennemis naturels de ces ravageurs. [56]; Kfir et *al.*, (2002) cités par [32] ont prouvé qu'en insérant le sorgho dans une association, les insectes ravageurs (cas de *Chilo partellus*) vont y focaliser leur attention au profit de la culture principale: c'est l'effet « bottom – up épigé, attraction ». Les mêmes auteurs cités par [32] ont démontré que le sorgho est un réservoir pour les ennemis naturels de foreurs et d'autres lépidoptères. Le taux de parasitisme des larves de lépidoptères pourrait atteindre 70 à 80% de larves tuées: c'est l'effet « top-down épigé, abris d'ennemis naturels ». Les travaux de [33] et de [34] ont montré que les facteurs foliaires physiques et chimiques des variétés du sorgho pourraient lui conférer un effet biocide sur les larves des lépidoptère attirés. [35]; [36] ont tous rapporté qu'une bande de sorgho insérée au bord des parcelles de coton, d'arachide et du maïs a réduit considérablement la population ainsi que les dégâts de la punaise verte *Nezara viridula* sur ces cultures de rente. Des études ont également montré que le sorgho associé à la culture de tomate, peut réduire la densité de *Bemisia tabaci* et de fait, la transmission du virus à la tomate en raison de la barrière physique qu'il constitue [37]; [38].

Quant à l'efficacité des plantes de service dans le temps, les aires sous les courbes de progression de la défoliation (figure 8) ont présentés la même allure que ça soit dans les parcelles d'association ou dans les parcelles témoins. Ceci a montré qu'il n'y a pas eu une influence spécifique sur l'un des traitements des paramètres météorologiques qui ont prévalu durant l'essai. Contrairement à ce que l'on sait des applications de pesticides (bio ou chimique) dont l'efficacité est fortement influençable par les facteurs du temps (pluie, température, vent, etc.), l'efficacité des plantes vivantes de service reste souvent insensible à ces paramètres. Ainsi, juste après l'application d'un insecticide, si une pluie survient, elle diminue drastiquement voir annule l'efficacité de ce dernier. De même, des journées très chaudes accélèrent la dégradation des molécules de pesticides appliqués en plein champ et baissent ainsi leur efficacité et leur rémanence. Par contre, les résultats d'analyses des données de la présente étude ont montré que le temps n'a pas agi de façon particulière ou spécifique individuellement sur les traitements. C'est un avantage majeur d'utilisation des plantes de service en association avec les cultures principales pour gérer les nuisibles de ces dernières.

Le sorgho et le basilic sont des plantes bien adaptées aux conditions du Sahel et de l'Afrique au même titre que le moringa. Elles peuvent être utilisées partout dans cet espace pour contrôler les ravageurs défoliateurs du moringa sans pour autant nuire à l'environnement et à l'homme. Ces plantes de service essayées avec succès, procureraient non seulement des services agroécologiques mais permettraient d'améliorer substantiellement les revenus des producteurs du fait de la vente de deux récoltes provenant d'elles même (sorgho ou basilic) et de la culture principale (moringa). Le basilic est une plante arbuste pluriannuelle et peut durer autant que le moringa au champ si elle reçoit le même entretien que la plante principale. Le sorgho peut être installé à chaque fois que l'on taille le moringa pour espérer jouir suffisamment de son service écosystémique avant la fin de son cycle. Les résultats très probants de cette étude encouragent à reprendre les tests dans les autres zones agroécologiques du sahel et promouvoir l'utilisation de ces plantes pour la gestion des défoliateurs notamment *Noorda blitealis* du moringa.

5 CONCLUSION

La production de moringa feuilles au Niger est une activité économique et de subsistance pour un grand nombre de femmes et de petits producteurs. Cette production déjà sujette aux aléas climatiques est fortement parasitée et oblige ces derniers à faire recours à des méthodes chimiques qui entravent l'environnement et la santé publique. La présente étude a contribué à la recherche des méthodes de gestion des ravageurs qui garantissent la bonne productivité et préservent la santé humaine et l'environnement sain. Les résultats obtenus sont intéressants et apportent un plus aux œuvres scientifiques déjà produites dans ce cadre au Niger. Le basilic et le sorgho testés comme plantes de service au moringa, ont réduit efficacement la pression parasitaire et diminué significativement la défoliation du moringa. Cette nouvelle pratique pourrait être ajoutée au paquet de techniques agroécologiques prouvées dans la gestion des ravageurs du moringa au Niger.

Cette nouvelle approche est forte applicable au niveau paysan et va permettre d'améliorer le rendement feuilles du moringa.

Toutefois, il serait intéressant de tester l'efficacité de ces associations dans les autres zones agroécologiques et pendant la saison sèche, de rechercher d'autres plantes de services efficaces contre ces ravageurs, d'étudier la compatibilité de cette méthode alternative avec d'autres méthodes agroécologiques prouvées et d'essayer les huiles essentielles de ces plantes étudiées notamment le basilic.

REFERENCES

- [1] J. A. William, L. N. Iddrisu, T.-D. Damian, O.-B. Kwame, et B. K. Kwami, « Nutrient composition of Moringa oleifera leaves from two agro ecological zones in Ghana », *Afr. J. Plant Sci.*, vol. 8, n° 1, p. 65-71, janv. 2014, doi: 10.5897/AJPS2012.0727.
- [2] H. DJIBO, « moringa oléfera un outil de développement local: cas de la commune rurale de Liboré », *Rev. Etudes Multidiscip. En Sci. Econ. Soc.*, vol. 2, n° 2, 2017.
- [3] D. Hassoumi, « Approvisionnement de Niamey en fruits et légumes: Acteurs de production et commercialisation », *Ann. L'Université Moundou Sér. A*, vol. 6, n° 1, 2018.
- [4] S. KABRE, « Biodiversité des insectes ravageurs foliaires chez Moringa oleifera (Lam.) dans les zones climatiques nord et sud soudanien du Burkina Faso », *Sci. Vie Terre Agron.*, vol. 8, n° 2, 2021.
- [5] B. Sultan *et al.*, « La question de la vulnérabilité et de l'adaptation de l'agriculture sahélienne au climat au sein du programme AMMA », *La Météorologie*, n° Spécial AMMA, p. 64-72, 2012.
- [6] L. M. Nassourou, B. Sarr, A. Alhassane, S. Traoré, et B. Abdourahmane, « Perception et observation: les principaux risques agro-climatique de l'agriculture pluviale dans l'ouest du Niger », *Vertigo- Rev. Électronique En Sci. Environ.*, vol. 18, n° 1, 2018, Consulté le: 9 octobre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://journals.openedition.org/vertigo/20003>.
- [7] M. C. E. DAO, M. TRAORE, S. PARE, D. OUEDRAOGO, et S. OUEDRAOGO, « Ravageurs des planches maraîchères de Moringa oleifera dans la région du centre (Burkina Faso) », *J. Anim. Plant Sci.*, vol. 25, n° 2, p. 3857-3870, 2015.
- [8] A. Ratnadass, O. Zakari-Moussa, H. Salha, J. Minet, et A. A. Seyfoulaye, « Noorda blitealis Walker, un ravageur majeur du Moringa au Niger (Lepidoptera, Crambidae) », *Bull. Société Entomol. Fr.*, vol. 116, n° 4, p. 401-404, 2011.
- [9] I. M. Bidima, « Production et transformation du moringa », *CTA ISF - Agro Ser.*, p. 40, 2016.
- [10] C. Couture, « Caractérisation de l'exposition aux pyréthrinoides dans la population rurale agricole de la Montérégie », *Univ. Montr.*, p. 91, 2008.
- [11] J. Barrault, « Les pratiques de jardinage face aux risques environnementaux et sanitaires des pesticides. Les approches différenciées de la France et du Québec », Sociologie, Université Toulouse le Mirail-Toulouse II; Université du Québec à Montréal, France, 2012.
- [12] S. A. BAFADA, M. D. M. ADAMOU, H. ADAMOU, B. ALI, A. Aissa Kimba, et P. Delmas, « Diversité des pesticides et leur utilisation dans la lutte contre les ennemis des cultures maraichères dans la zone périurbaine de Niamey, Niger », *Afr. Sci.*, vol. 15, n° 6, p. 374-383, 2019.
- [13] L. K. Agboyi, G. K. Ketoh, T. Martin, I. A. Glitho, et M. Tamo, « Pesticide resistance in Plutella xylostella (Lepidoptera: Plutellidae) populations from Togo and Benin », *Int. J. Trop. Insect Sci.*, vol. 36, n° 4, p. 204-210, 2016.
- [14] T. A. Houndété, G. K. Ketoh, O. S. Hema, T. Brévault, I. A. Glitho, et T. Martin, « Insecticide resistance in field populations of Bemisia tabaci (Hemiptera: Aleyrodidae) in West Africa », *Pest Manag. Sci.*, vol. 66, n° 11, p. 1181-1185, nov. 2010, doi: 10.1002/ps.2008.
- [15] L. Barascou, « Contributions à une meilleur évaluation de la toxicité des pesticides chez l'abeille domestique (Apis mellifera) », Avignon, 2022, p. 261. Consulté le: 11 octobre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2022AVIG0601>.
- [16] M.-N. De Visscher, « Compte-rendu de la réunion sur l'élimination des emballages et des stocks de pesticides périmés en Afrique de l'Ouest Niamey, Niger, 21-26 janvier 1990 », 1990.
- [17] FAO, « Gestion des pesticides dans l'agriculture et la santé publique: recueil des directives de la FAO et de l'OMS et d'autres ressources », 2021.
- [18] P. Marnotte, « Atelier d'échanges et d'écriture de projet thème« habitat et plantes compagnes » 18, 19 et 20 octobre 2011 Cotonou (Bénin): Divecosys Diversification des systèmes de culture pour une gestion agroécologique des bio-agresseurs en Afrique de l'Ouest », 2011.
- [19] R. Ayerza, « Seed yield components, oil content, and fatty acid composition of two cultivars of moringa (Moringa oleifera Lam.) growing in the Arid Chaco of Argentina », *Ind. Crops Prod.*, vol. 33, n° 2, p. 389-394, 2011.
- [20] M. M. Abdou, S. Issa, A. D. Gomma, A. Sow, et G. J. Sawadogo, « Estimation des rendements et de la rentabilité économique de production de trois cultures: le sorgho, le niébé et la dolique à Djirataoua (Maradi-République du Niger) », *J. Appl. Biosci.*, vol. 117, p. 11642-11650, 2017.
- [21] F. Milau-Empwal, J. Aloni, E. Mahele, A. K. Lema, et F. Francis, « Contribution à l'étude de la biodiversité entomologique associée à la culture de manioc (Manihot esculanta Crantz) dans le territoire de Mbanza-Ngungu (RDC) », *Entomol. Faun.-Faun. Entomol.*, 2020, Consulté le: 16 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://popups.uliege.be/2030-6318/index.php?id=4723>.
- [22] M. Venzon *et al.*, « Mobilisation des mécanismes de régulation naturelle des ravageurs via des plantes à multiples services écosystémiques », 2018.
- [23] R. J. Momperousse, « Evaluation de l'impact des plantes aromatiques, basilic (Ocimum basilicum) et gwo diten (Plectranthus amboinicus) associées à la tomate (Lycopersicon esculentum) sur les populations de ravageurs (Bemissia tabaci et Helicoverpa zea) et sur le développement de la tomate », PhD Thesis, ueh, 2011. Consulté le: 13 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://agritrop.cirad.fr/570334/>.
- [24] A. Ratnadass, E. Blanchart, et P. Lecomte, « Interactions écologiques au sein de la biodiversité des systèmes cultivés », *Cultiv. Biodiversité Pour Transform. L'agriculture*, p. 147-183, 2013.

- [25] B. Aboubaker, « Etude de l'abondance des nids d'hiver de la chenille processionnaire du pin «*Thaumetopoea pityocampa*» dans une forêt du parc national du Belezma. Effet de l'extraction du basilic sur les larves », Master 2-è science, Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf Mila, Algérie, 2021.
- [26] B. B. YAROU, « Bioefficacité d'*Ocimum* spp. (Lamiaceae) pour une gestion intégrée des ravageurs en cultures maraîchères », PhD Thesis, Thèse de Doctorat, Université de Liège-Gembloux Agro-Bio Tech, Belgique, 141 p, 2018. Consulté le: 13 octobre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://wiktrop.org/content/documents/document-53f2d76f-ef41-4451-9688-4de8f22f2696/695.pdf>
- [27] K. R. Debra et D. Misheck, « Onion (*Allium cepa*) and garlic (*Allium sativum*) as pest control intercrops in cabbage based intercrop systems in Zimbabwe», *IOSR J. Agric. Vet. Sci.*, vol. 7, n° 2, p. 13-17, 2014.
- [28] A. Geetha, S. Pidigam, P. S. Rao, V. Thuraga, S. K. Mohammad, et J. Suresh, « Holy Basil (*Ocimum sanctum* L.): An Important Indian Medicinal and Aromatic Plant: Its Properties, Utilization and Genetic Improvement », in *Medicinal and Aromatic Plants of India Vol. 2*, vol. 9, Á. Máthé et I. A. Khan, Éd., in *Medicinal and Aromatic Plants of the World*, vol. 9., Cham: Springer International Publishing, 2023, p. 13-35. doi: 10.1007/978-3-031-44914-7_2.
- [29] L. R. dos S. Tozin, M. O. Mayo Marques, et T. Maria Rodrigues, « Herbivory by leaf-cutter ants changes the glandular trichomes density and the volatile components in an aromatic plant model », *AoB Plants*, vol. 9, n° 6, p. plx057, 2017.
- [30] T. J. Bruce et J. A. Pickett, « Perception of plant volatile blends by herbivorous insects—finding the right mix », *Phytochemistry*, vol. 72, n° 13, p. 1605-1611, 2011.
- [31] K. V. Dhima, I. B. Vasilakoglou, T. D. Gatsis, E. Panou-Philotheou, et I. G. Eleftherohorinos, « Effects of aromatic plants incorporated as green manure on weed and maize development », *Field Crops Res.*, vol. 110, n° 3, p. 235-241, 2009.
- [32] B. Quaranta, « Effet des plantes de service sur les bio-agresseurs des cultures », *Rapp. Stage ISTOMCIRAD*, 2009, Consulté le: 15 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://open-library.cirad.fr/files/2/56__etude_bioagresseurs_quaranta.pdf
- [33] S. Woodhead et S. L. Taneja, « The importance of the behaviour of young larvae in sorghum resistance to *Chilo partellus* », *Entomol. Exp. Appl.*, vol. 45, n° 1, p. 47-54, sept. 1987, doi: 10.1111/j.1570-7458.1987.tb02254.x.
- [34] V. Kishore Kumar, H. C. Sharma, et K. Dharma Reddy, « Antibiosis mechanism of resistance to spotted stem borer, *Chilo partellus* in sorghum, *Sorghum bioclor* », *Crop Prot.*, vol. 25, n° 1, p. 66-72, 2006.
- [35] H. C. Sharma, M. K. Dhillon, G. Pampapathy, et B. V. S. Reddy, « Inheritance of resistance to spotted stem borer, *Chilo partellus*, in sorghum, *Sorghum bicolor* », *Euphytica*, vol. 156, n° 1-2, p. 117-128, juill. 2007, doi: 10.1007/s10681-007-9358-x.
- [36] P. G. Tillman, « Sorghum as a trap crop for *Nezara viridula* L. (Heteroptera: Pentatomidae) in cotton in the southern United States », *Environ. Entomol.*, vol. 35, n° 3, p. 771-783, 2006.
- [37] H. A. Smith et R. McSorley, « Potential of field corn as a barrier crop and eggplant as a trap crop for management of *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) on common bean in North Florida », *Fla. Entomol.*, p. 145-145, 2000.
- [38] B. Rhino, F. Vinatier, C. Thibaut, et C. Amour, « La dispersion des insectes, un paramètre important pour le contrôle des ravageurs », 2010, Consulté le: 16 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://agritrop.cirad.fr/556670/1/document_556670.pdf

Emergence, approaches and challenges of sustainable forest management in Central Africa

Maurice Mbuangi Lusuadi

Professor at Kasa Vubu University in Boma, RD Congo

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

ABSTRACT: The study revealed that sustainable forest management (SFM) is nothing new. It has always been a concern, both in Central Africa and worldwide. Several approaches have been put in place to make it a reality: certification, participation, the community approach, the integrated approach and the ecosystem approach. However, the implementation of these approaches, especially in the Central African sub-region, faces a number of challenges. Despite the efforts made, sustainable forest management is far from being a reality, and forest resources are deteriorating in many areas, or even disappearing altogether in others. This is why it is imperative that we continue to reflect on these issues and find solutions to ensure that these approaches are effectively applied, taking into account the reality of each environment, and that sustainable forest management becomes a reality.

KEYWORDS: emergence, approaches, challenges, Sustainability.

1 INTRODUCTION

Sustainable forest management has always been a major concern. In fact, sustainable forest management is important because it brings both socio-economic and ecological benefits to the people who depend on the forest for their survival. Forests provide goods and services that are consumed throughout the world and maintain the ecological balance. It is undoubtedly at the heart of a number of issues. In Central Africa, a region with a large forest area, its importance is recognised and approved by all, especially as a large part of the population depends on it. This research has therefore focused on the understanding and history of SFM in general. This will be followed by a review of the approaches used to implement sustainable forest management in Central Africa. It will also highlight some of the challenges associated with applying these approaches to the Congo Basin forest. This will help to formulate some useful recommendations for achieving sustainable management.

2 UNDERSTANDING SUSTAINABILITY

In ecology, 'sustainability' explains how biological systems remain productive at all times. This means that sustainability refers to the balance of a species with the resources of its environment. 'Sustainability' also refers to the maintenance over time of all soil or ecosystem functions through appropriate management. According to the Brundtland Report (1987), 'Sustainability' means meeting the needs of the present generation without sacrificing the ability of future generations to meet their own needs. It means promoting economic and social progress while respecting natural ecosystems and the quality of the environment. Thus, linked to human action in relation to its environment, sustainability refers to the balance between a species in relation to its environment and the factors or resources available to allow all its parts to function, without damaging health or sacrificing the capacities of another environment. Sustainable forest management, on the other hand, is synonymous with good forestry. However, forestry and forest management are sometimes perceived negatively by many forest ecologists, environmentalists and society in general. This perception is largely due to poor forestry practices such as the extraction of excessive quantities of timber and fuelwood, and illegal logging. These practices were very common in the past and are still fairly common in tropical forests [1], [2], [3], [4]. One of the most widely accepted definitions of SFM is that of the ITTO, which states that it is 'a forest management process aimed at achieving one or more clearly specified management objectives with

respect to the production of a continuous flow of desired forest products and services without such production resulting in an undue reduction in the intrinsic values and future productivity of the forest being exploited and without excessive undesirable effects on the physical and social environment' (OAB - ITTO, 2005). This definition appears to be both very forestry-oriented and utilitarian. It is based on a traditional logic of sustained yield and sustainability of forestry exploitation [5]. It follows from the above that the objective of SFM is not only to ensure the flow of goods and services, but also to maintain forest processes intact, including the maintenance of the diversity of functional species that provide the goods and services. From the outset, SFM considers forests in time and space [6]. At the Interministerial Conference on the Protection of Forests in Europe, held in Helsinki in 1993, Resolution H1 defined SFM as 'the management and use of forests and wooded land in a way and at a rate that maintains their biological diversity, productivity, regeneration capacity, vitality and their potential to fulfil, now and in the future, relevant ecological, economic and social functions at local, national and global levels; and that they do not cause damage to other ecosystems' [7]. According to the 2008 United Nations General Assembly, SFM 'aims to maintain and enhance the economic and social value of all types of forests for the benefit of present and future generations. It is characterised by seven elements: the extension of forest resources, forest biological diversity, forest health and vitality, the productive functions of forest resources, the protective functions of forest resources, the socio-economic functions of forests and the legal, policy and institutional framework' (UN, 2008/Resolution 62/98). In your opinion, it is quite simply a question of maintaining all the functions of the forest in order to satisfy the essential needs of those who depend on it or who will depend on it in the future. All these definitions show that the concept of SFM combines the principles of respect for the environment, social well-being and economic balance. SFM aims to maintain management that restores biodiversity at multiple scales, to ensure the viability or improved ecological resilience of forest ecosystems as a whole, while meeting socio-economic needs for the use of forest resources, timber, fauna, flora and forest landscape amenities. SFM also aims to introduce adaptive management [8], [9], [10].

The concept of SFM has also been adopted within wildlife, fisheries and environmental sciences, since 'wildlife and its habitats are (...) an essential component of our natural heritage characterised by significant biodiversity. The richness of this wildlife is highly dependent on the general management conditions of its habitats, the management of existing populations and the protection of the most sensitive species' [11], [12].

According to Beaurain [13], sustainability has now entered the arena of political discourse where it is losing its original meaning linked to sustainability in time and space. To this end, sustainability is seen as a normative concept that refers to what is 'good', 'desirable', or 'morally right', particularly when used in compound terms such as 'social sustainability', 'environmental sustainability' [14], [15].

Within this formal framework, SFM is defined as the use of forest land in a way and at a rate that maintains its productivity, regeneration capacity, vitality and potential to fulfil, now and in the future, the relevant ecological, economic and social functions, at local, national and global levels, and that does not cause damage to other ecosystems. For this reason, most countries have begun to adjust their policies more or less voluntarily, incorporating the principles of SFM into their speeches and certain acts relating to the management of natural resources.

From this perspective, sustainable management is used as a source of inspiration for the process of developing standards for environmental resources and economic development [16].

But how did the idea of sustainable forest management come about ? The following paragraph attempts to answer this question.

3 HISTORY OF SUSTAINABILITY

Sustainable management has its origins in the protection of forests, the first laws of which were enacted in Ur in 2700 BC. But sustainability as a scientific concept goes back two millennia. The first forest conservation measures are recorded in Assyria in 700 BC, when hunting reserves were closed by the Royal Hunting Decree [17], [18], [19].

In fact, in 300 BC, the Chinese philosopher Mercius expressed his concern about deforestation as a result of timber harvesting, overgrazing by mountain bulls and the impact of this deforestation on river flows. At the same time, Platon described deforestation in the hills around Athens as a result of wood consumption and agricultural clearing. Indeed, Plato explains that 'there used to be forests on the mountains, but they have since been cut down, which has led to erosion' [20], [21].

Over the following centuries, a variety of forest management practices were adopted. Their aims were to prevent flooding, ensure the supply of wood and maintain forest areas. Federau [21] refers to the reforestation of deforested hills in Japan in the 9th century to prevent flooding of lower catchments or the new forest created in England in the 11th century.

In 14th century France, the forests almost disappeared before being saved by political measures. Specifically, in 1346, the Brunoy ordinance stated that 'the masters of the waters and forests will survey and visit all the forests and woods and will sell them in order to prevent the said forests from being perpetually maintained in good condition'. It was at this time that the notion of the forest's 'potential' emerged, i.e. its ability to produce goods sustainably. This is the concept of sustainable management. It was thanks to this concept that Colbert launched a major reform of forests, reaffirming this principle in the name of future generations [22], [23].

In the 17th century, the term sustainability was explicitly used in forest management. For foresters, 'sustainable management consists of exploiting forest resources, wood or other forest products, while maintaining the capital standing so as to pass it on intact to future generations. Only the interest on the capital, or part of it, is harvested. In other words, the harvest only concerns the annual biological growth which, if it were not harvested by man, would be naturally consumed by the various recyclers such as bacteria, fungi and animals. Man thus partially replaces the natural recyclers' [24].

In the 18th century, Hans Carl von Carlowitz published 'Silvicultura oeconomica' in 1713, in which he called for wood to be conserved, increased and used in a continuous, stable and sustainable manner [25]. This was the first documented use of the German term 'Nachhaltigkeit' for sustainability.

In 1795, Hartig formulated the principle of sustainability from an intergenerational perspective, writing: 'It is not possible to conceive of sustainable forestry, nor to expect it to be achieved, if the allocation of timber from forests is not calculated with sustainability in mind... Therefore, any wise forest management must impose taxes (by setting a value base) as high as possible on forests, aiming, however, to use the forests in such a way that future generations can derive at least as much benefit from them as present ones' [26].

In the same century, Thomas Robert Malthus [27], in his 'Essay on the Principle of Population', highlighted the inadequacy of resources to feed a growing population in the 18th century. For Jégou [28], his questioning of the finiteness of the earth's resources is one of the sources of inspiration for sustainability.

In the 19th century, a number of economists addressed the principle of sustainability, expressing concern about resources: should they be exploited or preserved? They included Tassy Louis (1816 - 1895), Henry David Thoreau (1817 - 1862), Ralph Waldo Emerson (1803 - 1882) and George Perkins Marsh (1801-1882). And the main purpose of forestry is the production of wood; all other goods and services from the forest are considered to be products [28].

Tassy [29] sees forest management as the regulation of the harvesting of a forest in order to obtain a sustainable annual yield that is 'sustained' and as advantageous as possible. Henry David Thoreau, for his part, was driven throughout his life by a passion for the wilderness. Nature was to be his main subject of writing, so much so that a literary genre has been attributed to him: 'nature writing', where poetic sensibility, scientific knowledge and militancy in favour of environmental protection are combined [30], [31].

For Ralph Waldo Emerson, nature is sometimes a mirror, accessible and transformable, sometimes an erotic and all-consuming excess. In his writings, he mentions that 'the greatest pleasure to be derived from fields and woods is the secret relationship they suggest between man and plants...' [32].

George Perkins Marsh (1864), in his book *Man and Nature*, is recognised as the first conservationist. In it, he gives a vivid description of the process of environmental degradation in Europe. And it was thanks to this work that his readers were convinced of the need for reasoned management of natural environments [33].

In 1889, Lucien Boppe modernised the science of forestry and published a treatise on silviculture that became a worldwide standard-setter. At the end of the 19th century, Biolley [34] pointed out that silviculture and forest management were tools for safeguarding forests. According to him, sustained yield is the result of a balance between the increase and growth of stocks.

In the 20th century, in 1910 to be precise, Gifford Pinchot wrote a veritable firebrand: 'The Fight for conservation'. In it, he wrote 'Our unsurpassed health and well-being are the direct result of our country's superb natural resources and the way our people have used them, now and in the past. We are prosperous because our grandparents bequeathed us a land of marvellous resources that are still inexhaustible. Should we preserve these resources and, in turn, pass them on to our descendants? If we don't, those who come after us will have to pay the price in poverty, decadence, failure to progress and prosperity as we know it.

When natural resources will be exhausted, disaster and disintegration in all areas of life will follow. The preservation of natural resources is therefore the basis, and the only basis, for our nation's success. There are other conditions, but this is the foundation' [35].

In 1920, Cotta noted that climate and soil influence the shape of trees and, consequently, the standing volume of forests [33]. And, since then, the concept of SFM has taken off following the United Nations Conference on Environment and Development (known as the Earth Summit), held in Rio de Janeiro, Brazil in June 1992.

SFM therefore involves maintaining and enhancing the economic, social and ecological values of forests for the benefit of present and future generations. This concept is closely linked to that of sustainable development, which refers to natural resources. It also shows that sustainable forest management is an economically viable, socially acceptable and environmentally friendly activity [36].

4 SUSTAINABLE FOREST MANAGEMENT IN CENTRAL AFRICA

4.1 A BRIEF PRESENTATION OF THE FORESTS OF CENTRAL AFRICA

The forests of the Congo Basin contain the second largest area of dense tropical rainforest after the Amazon. These forests cover 530 million hectares of total forest area; 268 million hectares of forest area; 6% of the world's forest area; 70% of Africa's forest cover and 91% of Africa's dense rainforests. They are shared between six countries: Cameroon, the Central African Republic, the Republic of Congo, the Democratic Republic of Congo, Gabon and Equatorial Guinea [37]. However, an analysis of their evolution reveals a considerable increase in the annual rate of disturbance between 2015 and 2020, which rose to 1.79 million ha per year from 1.36 million ha in 2005 and 2015. The main causes of this situation include the increase in cultivated areas, population growth and infrastructure development [38]. The distribution of these forests can be seen in Figure 1 below.

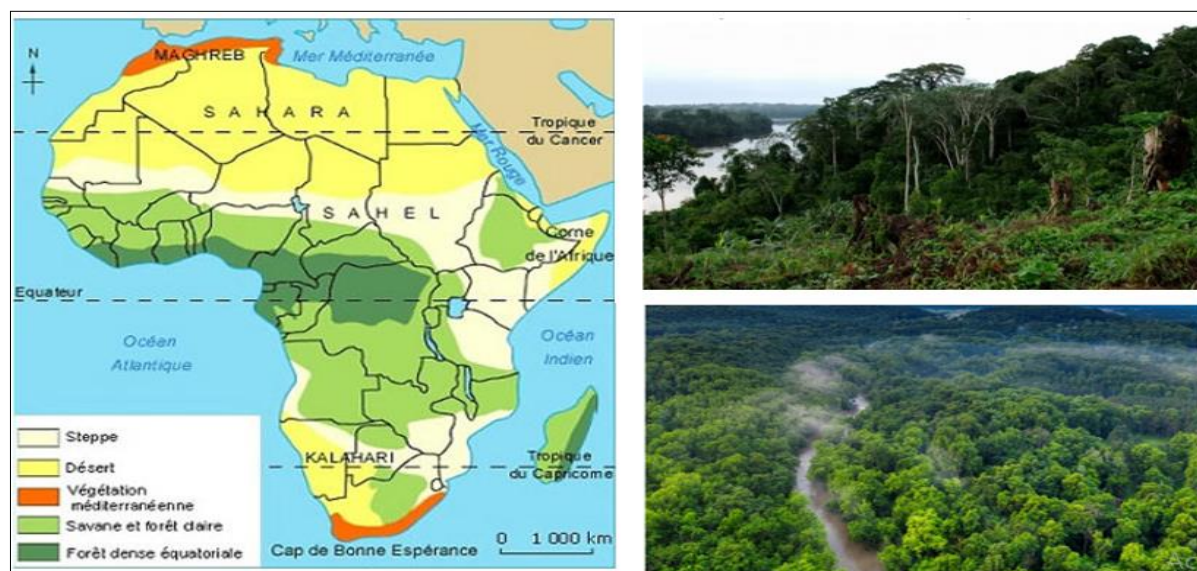


Fig. 1. The forests of Central Africa (Cifor, 2021)

In terms of their roles, these forests make a diverse contribution to the economies of the countries of Central Africa. A significant part of the contribution of forests to the socio-economic development of Central African countries is made through the value chains of non-timber forest products, fuelwood and the exploitation of wildlife for food purposes, value chains which are, however, still dominated by the informal sector.

To manage these forests, the governments of the countries in this region, under pressure from international organisations and donors, have been forced to overhaul their legal and institutional frameworks, to adopt a coherent framework for action (national environmental management programmes, national forestry action plans, etc.) and to adopt modern planning, management and monitoring tools. In fact, the pressure being exerted on these countries was inviting them to manage their forests sustainably.

To make it operational, SFM is on the agenda of the Central African states. This is why the six forested countries of the Congo Basin have designed and adopted forestry policies with the aim of reducing poverty, particularly in rural areas, helping to improve their national economies and promoting responsible management of biological diversity [39], [40], [41].

In practice, implementation of SFM results mainly in the management of forest concessions by export-oriented industrial companies [42]. The sustainable forest resource management approaches that have been put in place are described in the next section.

4.2 APPROACHES TO SUSTAINABLE FOREST MANAGEMENT IN CENTRAL AFRICA

Several approaches are currently used to manage forests in Central Africa sustainably. These include various forms of certification (FSC, FLEGT, private certificates), the integrated approach, the ecosystem approach, and the participatory or community approach [3], [39], [43].

Certification, initiated in 1989 by the Rainforest Alliance, has been promoted as a quality standard aimed at assuring consumers of timber and timber products that they come from forests whose production and management systems respect the principles and criteria of sustainability. It is a procedure whereby a third party provides a written commercial assurance/label that a product, process or service conforms to specific standards on the basis of an audit conducted according to agreed procedures [44], [45], [46]. As a result, it is a mechanism for certifying, after independent and neutral verification, that a product or service meets a given norm or quality standard. The result is the award of a label [47].

The integrated approach, although not highly developed in the field of forest management, emerged in some Western countries in the 1990s. Its role is to compensate for the shortcomings of sectoral management in ensuring equitable planning between the socio-economic uses deriving from the exploitation of natural resources and the underlying social players. Through a holistic approach, it aims to take account of the entire territory that is the subject of planning, without forgetting the different uses and stakeholders involved [48]. This approach responds to the public's demand for access to forest management, which is seen as a shared natural, social and economic heritage. Any decision taken in terms of management must therefore be taken in consultation with methods adapted to the 'multi-objective' and 'multi-actor' context, allowing consultation and the development of a reasoned and well-documented decision-making process.

The ecosystem approach was first developed by Watt [49] in its application to forestry. This approach is the 'main framework for action' of the Convention on Biological Diversity. It is based on taking into account the resilience of ecosystems, their capacity to regenerate and the interactions between their components [50], [51]. The aim is to ensure that biodiversity is adequately protected, in response to the shortcomings of traditional management, which did not take account of the characteristics of natural systems. As a result, the environment will have to be perceived as a number of interacting sub-systems. The ecosystem approach can also be better understood by the description of the principles for its application as agreed at the Malawi meeting in 1998 'Malawi Principles' and described by the Convention on Biological Diversity: 'a strategy for the integrated management of land, water and living resources that promotes the conservation and sustainable use, in an equitable way, of the benefits arising from the utilization of genetic resources' [52].

The participatory or community approach, for its part, originated in the Bali Declaration (2007), through the role of local communities in the sustainable management of protected areas. It lays the foundations for integrating these sites into their social environment, while at the same time reducing conflictual relations between conservationists and local populations due to their divergent interests. This approach is presented as one that can lead to the emergence of new regulations based on the dynamics of consultation, co-management and co-decision. As an illustration of sustainable forest management, participatory management is another common feature of the legal frameworks applied in the countries of the Congo Basin [53], [54].

Generally speaking, two types of operation promote the involvement of local people in forest management. The first promotes the management of forest exploitation concessions according to rules defined in a management plan, where local practices must be accepted and promoted. The second relates to community forests, which are considered to be the most complete example of decentralisation of forest management to the local population [55], [56], [57].

According to Nyange [58] and Mbuangi [59], the strengths of this approach lie in the fact that it focuses on socio-cultural and political factors and emphasises the power of collective action and the ability of local communities to influence the social and political systems in which they live. It is therefore a forest management strategy that implements actions likely to guarantee the sustainability of forest landscapes and ecosystems. To achieve this, the fight against poverty by promoting entrepreneurship and the use of techniques with low impact on the forest should be promoted.

5 CHALLENGES TO SFM IN CENTRAL AFRICA

The SFM approaches, briefly analysed in the previous section, refer to appropriate planning between the socio-economic uses deriving from the exploitation of natural resources and the underlying social actors, as well as taking into account the resilience of ecosystems, their capacity for regeneration and the interactions between their constituents. It also considers the

environment as a set of interacting sub-systems. It is based on the dynamics of consultation, co-management and co-decision. It promotes the fight against poverty by encouraging entrepreneurship and the use of techniques that have a low impact on the forest. Finally, it encourages producers to improve their practices to ensure that a product or service meets a given norm or quality standard.

In fact, several studies show that there are considerable difficulties in implementing these approaches in forest management. Not all the solutions proposed by these approaches are implemented.

The ecosystem approach, as applied throughout the world, including in Central Africa, faces enormous challenges. According to the FAO (2006), these include - the mismatch between the expectations of stakeholders, including the general public, and available forest resources; - difficulties in reconciling the competing objectives of the many stakeholders who use the resources of the same ecosystems; - insufficient knowledge of ecosystem interactions and the response of different ecosystem components to specific management measures. - inadequate capacity of management agencies and stakeholder groups to cope with the additional demands of the ecosystem approach to forest product use.

With regard to certification, for example, the work of Cerruti and Nasi [60] revealed that mechanisms offering to certify timber from concessions that have a forest management plan and comply with certain specifications remain marginal, and only 9% of forest concessions were certified in 2018.

In Central Africa, this approach faces many obstacles. As highlighted by Teketay & al., [61], the challenges associated with this process include: - the unsustainability of forest certification initiatives due to a lack of appropriate capacity; - lack of accreditation and certification at local level; - insufficient capacity for verification and certification of ecosystem services; - demotivation of forest operators due to the complexity of forest certification standards and procedures; - the fact that forest certification processes are voluntary and lack market-oriented legal requirements; - the lack of awareness of forest certification in some countries. To these difficulties must also be added the insufficient involvement of the government in forest certification, despite the fact that in several countries forests are state property. It should not be forgotten either that forest certification is a good tool for medium-sized and small companies, but that it represents a major challenge for small producers, who lack economies of scale.

The challenges facing the integrated approach are also enormous. These include the complexity of immersing oneself in a negotiated cognitive process where, as Lapointe [62] has argued, taking ecosystems into account transposes a set of structural rules onto the management framework. It will also be necessary to recognise the scale of the system of human activities generated by integrated forest management and the complexity of ecosystems. This suggests that the challenge of such management lies in the effort involved in designing the information system and maintaining its use. For the countries of Central Africa, this approach therefore faces the challenge of taking into account all the uses and players involved, not forgetting knowledge of the multi-resource use of forests. Another challenge in implementing this approach is to ensure the sustainable management of forest resources while taking into account the demands of economic development, as well as the social and environmental needs of growing populations, in a context of climate change that is impacting forest ecosystems.

There are many difficulties and constraints associated with participatory management. These include, for example, the ideological rivalry between, on the one hand, conservationists who criticise the potential impact of populations on nature and advocate forest conservation excluding all human activity [63] and, on the other hand, those who campaign for the use of forests by the local populations who depend on them to be taken into account. It should also be pointed out that implementing such an approach, which requires the effective involvement of local people, is a real challenge. Mbuangi [59] has acknowledged that the significant dependence of local communities in the Luki Biosphere Reserve in the DRC on the forest, their low level of education and lack of training constitute a major obstacle to their participation in the sustainable management of forest ecosystems, not to mention the demographic pressure and short-term economic interests they aim to obtain from the forest. For his part, Nkeoua [64] highlighted several challenges linked to participation in forest management in Central Africa. He alluded to the fact that forest ecosystem conservation programmes developed in Central Africa, as well as attempts to involve local communities, are carried out through the participation of NGOs in meetings and various committees monitoring the management of protected areas or the development of management plans. However, these NGOs are not established within the community. They do not have enough field experience and have few links with local populations. These NGOs are run by intellectuals who, for the most part, do not have a good understanding of the real problems experienced by local people. What's more, local people do not really benefit from the exploitation of forests or the conservation of wildlife.

6 CONCLUSION

This study has successively defined SFM, analysed its evolution and presented the approaches recommended for sustainable forest management. Ultimately, SFM involves using production to meet current needs without compromising those

of the future. It is, in fact, an act of solidarity between present and future generations, because we need to think about meeting their needs.

This is why a number of approaches have been put in place to ensure that sustainable forest management becomes a reality in this region of Central Africa, so that its population, most of whom depend on it, can actually enjoy the benefits of the forest and the economic advantages it provides now and in the future.

However, several studies carried out in Central Africa have highlighted the main obstacles to sustainable forest management. These are enormous and constitute an obstacle to improving the living conditions of the people who depend on the forest for their survival.

For this reason, this study considers that certain measures need to be taken as a matter of urgency, and that certain behaviours need to be adopted by the population, those involved in forest exploitation and the governments of Central African countries. These include continuing to think in a participatory way to ensure that the desired approach, in line with the requirements of each environment, is actually applied; stepping up law enforcement against those who infringe SFM, because SFM is incompatible with the notion of « let it happen »; and setting up organisations within forest-dependent communities to encourage their effective participation in forest management. In short, the aim is to remove all obstacles to the effective implementation of SFM.

REFERENCES

- [1] Lanly, J.P., 1999: Forest management and sustainable development. *French Forestry Journal*, 51 (sp), 45-49. DOI: 10.4267/2042/5503.
- [2] Lanly, J.P., 1994: Changes in the state of forests in the 20th century. *Ecodecision*, 13, 28 - 32.
- [3] Gareau, P., 2004: Sustainable forest management worldwide: socio-political perspectives and alternative approaches. Environmental synthesis (Doctoral thesis). Quebec University, Montréal, 61 p.
- [4] Sist, P.E, Rutishauser, E, Pena-ClaroS, M, Shenkin, A, Herault, B, Blanc, L, Baraloto, C, Baya, F, Benedet, F. & Da Silva, K. E., 2014b: The Tropical managed Forests Observatory: A research network addressing the future of tropical logged forests. *Applied Vegetation Science* 18: 171–74.
- [5] Smouts, M.C., 2001: Tropical forests, international jungle. Rennes: Presses de sciences PO. 349 p. <https://doi.org/10.3917/scpo/smout/2001.01>.
- [6] Thompson, C.R., Shanna, H.S, Moore C.J. & Frederic, V. S., 2009: Our plastic age. *Philosophical Transaction of The Royal Society*, 364, 1973 – 1976.
- [7] Barthod, C. & Touzet, G., 1994: From Strasbourg to Helsinki. The first two ministerial conferences for the protection of forests in Europe. *Revue Forestière Française*, 4 (319 - 334).
- [8] Lindenmayer, D.B & Franklin, J.F, 2002: Conserving Forest Biodiversity: A comprehensive multiscaled approach. Washington DC: Island Press, 368 p.
- [9] Hulme, P. E., 2005: Adapting to climate change: is there scope for ecological management in the face of global threat? *Journal of Applied Ecology*, 42 (5), 784 - 794.
- [10] Koskela, J., Buck, A. & Teissier Du Cros, E., 2007: Climate change and forest genetic diversity: implications for sustainable forest management in Europe. Roma: Biodiversity international, 111 p.
- [11] Burley, J., 2002: Forest biological diversity: an overview. *Unasylva* 209 (53): 3 - 9.
- [12] Fortier, A. & Alphantery, P. (2012). Les enjeux d'une gestion durable de la faune sauvage. La mise en œuvre des ORGFH en France. *Economie Rurale* 327 - 328: 52 - 64.
- [13] Beaurain, C., 2003: Local environmental governance and economic behaviour. A new perspective on the relationship between time and space. *Sustainable development and territories*, Dossier 2, 19 p.
- [14] Verchère, A., 2011: Sustainable development in question: economic analyses around an improbable compromise between optimistic and pessimistic acceptances of the relationship between Man and Nature. *L'Actualité Economique*, 87 (3), 337 – 403.
- [15] Boisvert, V., Carnoye, L. and Petitimberty, R., 2019: Strong sustainability: epistemological and political issues, from ecological economics to other social sciences. *Sustainable development and territories* [Online], 10 (1). https://doi.org/10.4000/Developpement_durable.13837.
- [16] Boyle, A. & Freestone, D., 1999: International law and Sustainable Development: Past Achievement and Future change. Oxford: Oxford University Press, 364 p.
- [17] Dixon, J.A. & Sherman, P.B., 1990: Economics of protected areas: a new look at benefits and costs. London: Island Press, 251 p. DOI: <https://doi.org/10.4000/ethnoecologie.160>

- [18] Grove, R.H. & Hémery, D., 1999: Green Imperialism, Colonial Expansion, Tropical Island Edens and the Origins of Environmentalism, 1600-1860. Dans Marie-Noëlle Bourguet et Christophe Bonneuil. From inventorying the world to developing the globe. Botany and colonisation (late 17th century - early 20th century). French Review of Overseas History, 86 (322-323), 337-341.
- [19] De Wever P., Cornee, A., Egorof, G., Duranthon, F., Lalanne, A., De Kermadec, & Lucet, S., 2019: Geological heritage: concept, state of the art, Valorisation. *Naturae* 2019 (1), 1-58.
- [20] Waley, A., 2005: Three ways of thought in amount China. Routledge Stratford, C.A.: Stratford University Press, 280 p.
- [21] Federau, A., 2017: Pour une philosophie de l'anthropogène. Paris: PUF, 435 p.
- [22] Clément, V., 2004: Le développement durable: un concept géographique? Lion: ENS, 125 p.
- [23] Sylvie B. & Hervé R., 2019: The Forest in the Middle Ages, Les Belles Lettres, Paris, 419 p.
- [24] Hartig G. L., 1805: Instructions on woodland cultivation for foresters () translated from the German by J.-J. Baudrillart. Paris: Levraut, 173 p.
- [25] Schmithüsen, F., 2013: Three hundred years of applying sustainability to the forest sector. *Unasylva*, 240 (64), 9 p.
- [26] Malthus, T. R., 1798: Essay on the population principle (translated from English by Pierre, P. & Prévost, G.). Paris: Guillaumin et C°, 236 p.
- [27] Jégou, A., 2007: French geographers and sustainable development. *Geographic Information*, 3 (71): 6 - 18. DOI: 10.39117/lig.713.0006.
- [28] Glück, P., 1984: Die Einstellung österreichischer Stadtbewohner zum Wald. *Forstwesen*, 101 (3), 142-159.
- [29] Tassy, L., 1858: Studies on forest management. Paris: Hachette, 432 p.
- [30] Latour, D., 2010: Henry David Thoreau or the ecological reveries of a solitary walker. *Les chantiers de la création*, 3. DOI: <https://doi.org/10.4000/lcc.244>
- [31] Grandjeat Y.C., Englebert J.P., Campos L. & Chapoutier G., 2011: The place of the animal in American environmental literature. In Engélibert, G. Campos, L., Coquuo, C. & Chapoutier, G. (dir). *The Animal Question. Between science, literature and philosophy*. Rennes: Presse Universitaire de Rennes, 107 - 119.
- [32] Zaninetti, J.M., 2012: The environment, a contentious issue. *The spaces of North America*, 169 – 182.
- [33] Guillaume, B., Demeulanaere, E. & Feuerhahn, W., 2017: Environmental humanities. *Investigations and counter-investigations*. Paris: Sorbonne, 350 p.
- [34] Biolley, H.E., 1920: Forest management according to the experimental method and especially the control method. Paris: Neuchâtel, 90 p.
- [35] Le Tacon, F., 2012: Développement durable ou gestion durable?. *Revue forestière française*, 2012, 64 (1), pp.83-96.
- [36] Wolfslehner, B., Vacik, H. & Lexer, M.J., 2005: Application of the Analytic Network Process in multi-criteria analysis of sustainable forest management. *Forest Ecology and Management* (207), 157-170.
- [37] Laurence C., 2021: Central African forest: what remains to be saved, in lemonde.fr, Le Monde, 05 October 2021.
- [38] Gillet, P., Vermeulen, C., Feintrenie, L., Dessard, H. & Garcia, C. 2016: What are the causes of deforestation in the Congo Basin ? Synthèse bibliographique et études de cas, *BASE*, Volume 20, 2016, Issue 2. DOI: 10.25518/1780-4507.13022.
- [39] Lescuyer, G., 2004: Criteria and indicators for sustainable forest management: some lessons from current experiences in Central Africa. *Proceedings of the international symposium 'Sustainable development: lessons and prospects*. Ouagadougou: International Organisation of the Francophonie, 63-69.
- [40] Kuma, J.K., 2020: Poverty and unemployment in the Democratic Republic of Congo: state of play, analysis and prospects. University of Kinshasa: CREQ, 24 p.
- [41] Mbuangi, L.M., 2022: Socio-economic and ecological issues of the charcoal industry on the outskirts of the town of Boma in the DRC (PhD thesis). University of Kisangani (DRC), 175 p.
- [42] Karsenty, A., Lescuyer, G. & Nash, R., 2004: Is it possible to determine criteria and indicators for the sustainable management of tropical forests ? *French Forest Review* 506 (5), 457-471.
- [43] Mankoto, S. & Maldague, 2003: Systemic strategy applied to biodiversity management, the case of the Luki Biosphere Reserve (DRC). Paper submitted to the 12th World Forestry Congress, Quebec City: Canada, 35 p.
- [44] Bass, S., 2001: Forest certification. Report prepared by the Advisory Group on ForestCertification (GCCF). European Forest Institute, 36 p.
- [45] Briec, L. & Mandard, M., 2016: The failure of forest certification. The case of FSC certification examined through the sociology of translation. *Mondes en développement*, 1 (173), 63 - 78.
- [46] Van Dijk, S., Stas, S., Van Benthem, M., 2020: Overview of forest certification schemes for sustainable forest management in Gabon. Wageningen: CTA, 37 p.
- [47] Cuny, P., 2011: Current status of community and communal forestry in Cameroon. Wageningen: Tropenbos International Congo Basin Programme, 110 p.
- [48] Margerum, R. D., 1999: Integrated Environmental Management: the Foundations for Successful Practice. *Environmental Management*, 24 (2), 151 – 166.

- [49] Watt, A. S., 1947: Pattern and Process in the Plant Community. *Journal of Ecology*, 35 (1 et 2), 1 – 12. DOI: 10.2307/225649749.
- [50] Gareau, P., 2005: Approaches to sustainable and democratic forest management worldwide. *Vertigo* 6 (2). <https://doi.org/10.4000/vertigo.2717>.
- [51] Brou, A. N., 2005: Approches stratégiques de gestion durable des ressources forestières: La place de la transdisciplinarité. Abidjan: Université Félix Houphouët-Boigny, 11 p.
- [52] CDB., 2004: Ecosystem Approach (CBD Guidelines), Montreal: Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 51 p.
- [53] Nguinguiri, J.C., 1999: Participatory approaches to forest ecosystem management in Central Africa: a review of existing initiatives. Michigan: CIFOR, 24 p.
- [54] Karsenty, A., 2008: Problematic local communities. In *Concerted management of natural resources. The test of time*. Gret: Karthala, 277- 288.
- [55] Oyono, P.R., Ribot, J.C., Mvondo, A.S. & Logo, P.B., 2007: Corrective measures for decentralised forest management in Cameroon: options and opportunities from ten years of experience *Governance Brief*, 33 (f). Bogor: CIFOR, 12 p.
- [56] Joiris, D.V. & Bigombe, P.L., 2010: Participatory management of Central African forests. Versailles: Quae, GIE, 236 p.
- [57] Lescuyer, G. & Cerutti, P., 2013: Sustainable forest management policy in Central Africa. Taking the informal sector into account. *Perspective* (21), 1 - 4.
- [58] Nyange N. M., 2014: Local community participation and sustainable forest management: the case of the Luki Biosphere Reserve in the Democratic Republic of Congo (PhD thesis). Laval University, Quebec, 205 p.
- [59] Mbuangi, L.M., 2016: Participation in the sustainable management of natural resources: current constraints of local communities in the RBL in the DRC. Saarbrücken, EUE, 100 p.
- [60] Cerruti, P. O. & Nasi, R., 2021: Sustainable forest management (SFM) of tropical moist forests: the Congo Basin', in Blaser, J., Hardcastle, P. (Eds.) *Achieving sustainable management of tropical forests*, Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge.
- [61] Teketay D., Mbollo A. M. M., Kalonga S. K. & Ahimin O., 2016: Forest certification in Africa: achievements, challenges and opportunities. *African Forest Forum*, Nairobi, Kenya. 172 p.
- [62] Lapointe M., 1999: La gestion intégrée des forêts et le développement des systèmes d'information. IRECUS, Essai présenté au programme de maîtrise en gestion et développement des coopératives, Université de Sherbrooke, 84 p.
- [63] Devall, B. & Sessions G., 1985: *Deep Ecology: Living as if Nature Mattered*, UT: Gibbs Smith, Salt Lake City, 267 p.
- [64] Nkeoua, G., 2003: Challenges of sustainable management in the Congo Basin. *World Forestry Congress XII*.

Contribution to studies on the impact of marine pollution on groundwater quality in the islands

Mamadouba Sylla¹, Moussa Diallo¹, Kandas Keita¹, and Alpha Oumar Bah²

¹Higher Institute of Mines and Geology of Boké, Guinea

²Gamal Abdel Nasser University of Conakry, Guinea

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 review, based on the impacts of marine pollution on groundwater quality in the islands, provides ample evidence of the complexity of the socio-economic and environmental management of the islands due to their geographical position and human pressure. The coastal ecosystem of the islands is complex, dynamic and, above all, vulnerable to human activity, marine intrusion and climate change.

In addition, it can come from a variety of sources such as agriculture, industry, tourism, inadequate waste management and mining activities. It is essential for these island communities to implement effective measures to prevent groundwater pollution and protect their precious water resources.

The aim of this study was to review the literature on the impact of marine pollution on groundwater quality in island regions. The aim was to identify all the parameters influencing groundwater pollution on islands.

KEYWORDS: impact, marine pollution, quality, groundwater, islands.

1 INTRODUCTION

Around 2.1 billion people in the world, or 30% of the population, do not have access to domestic drinking water services [1].

Water is a very abundant resource on the planet and is distributed between four major reservoirs: the oceans [around 97.2%], polar ice [2.15%], continental water (surface and groundwater) [0.649%] and the atmosphere [0.001%]. The hydrological cycle ensures exchanges and equilibrium between the atmosphere and the other terrestrial compartments through precipitation, evaporation, evapotranspiration, infiltration and runoff [2].

One of the major challenges for the sustainable use of a water resource is its quality in aquifers. In recent years, global water quality has deteriorated significantly due to uncontrolled industrial discharges, the intensive use of chemical fertilisers in agriculture and the haphazard exploitation of water resources [3].

Water is a precious natural resource that is essential for many uses. Its use for food or hygiene purposes requires excellent physico-chemical and microbiological quality [4].

The use of groundwater resources around the world is becoming increasingly popular as a result of the deterioration in surface water quality caused by human activities. The world is currently facing a serious problem of degradation of groundwater quality in connection with anthropogenic activities and population growth [5].

[3] indicated in his work that, in general, groundwater is threatened by numerous sources of pollution (urbanisation, industry, livestock farming, uncontrolled dumping, marine intrusion, etc.), which have multiplied throughout the world without any measures being taken to protect the environment, and water resources in particular.

Water scarcity has become a crucial problem for all societies, particularly those in developing countries. Population growth and the development of urban areas, industrial units and cultivated land have led to a deterioration in the quality of groundwater and a significant drop in reserves, which are sometimes the only water resources available to feed the population [6].

The drinking water sector is one of the driving forces behind the economic and social development of the world's populations. Despite this, the potential of the resources mobilised to find it is insufficient because of growing demand. In order to meet people's water needs, a series of hydrogeological prospecting campaigns in different countries is essential [7].

2 PRESENTATION OF THE INSULAR COASTAL ZONE

The coastal zone, also known as the coastline, is a dynamic and complex geographical region located at the boundary between land and sea. It is characterised by a great diversity of landscapes, ecosystems and natural resources [8]. It includes a variety of ecosystems such as beaches, salt marshes, estuaries and coral reefs, which are home to a rich biodiversity and play a crucial role in regulating the climate and protecting land from erosion [9].

In the world as a whole, the coastal zone is a crucial ecosystem that provides vital ecosystem services (in terms of the economy, culture and food security) for human communities and biodiversity. In West Africa, it plays a significant role in the regional economy. According to [10] the coastal zone of West Africa is home to a large proportion of the region's population and supports vital economic activities such as fishing, tourism and maritime trade. These economic activities are highly dependent on the natural resources provided by the coastal zone, underlining its importance to the socio-economic well-being of local populations [10].

According to [9] anthropogenic pressures on the coastal zone have increased in recent decades, jeopardising its ability to provide crucial ecosystem services. To meet these challenges, integrated and sustainable management of the coastal zone is essential. Hence the focus of a recent study in which the authors highlighted the importance of holistic approaches to managing coastal zones in order to preserve their ecological integrity while meeting the socio-economic needs of local communities [11].

However, the coastal zone also faces growing environmental challenges such as urbanisation, pollution from plastic waste and industrial discharges that threaten the health of coastal ecosystems, climate change and the exploitation of natural resources. Climate change, pollution, habitat loss and over-exploitation of marine resources threaten the sustainability of the coastal zone [10]. In addition, it leads to sea level rise and extreme weather events that can have devastating consequences for coastal communities [12].

2.1 GEOGRAPHICAL CONTEXT OF THE WORLD'S COASTAL ZONE

The geographical framework of the world's coastal zone spans the continents and islands of the globe (see Fig. 1). Coastal zones are present on all continents and are often populated because of their natural and economic attractiveness [11]. The work of [13] illustrates the importance of the coastal zone in the world: these zones are among the most dynamic regions in the world in terms of human activities and interactions with the natural environment. They are also among the most vulnerable to global environmental change.

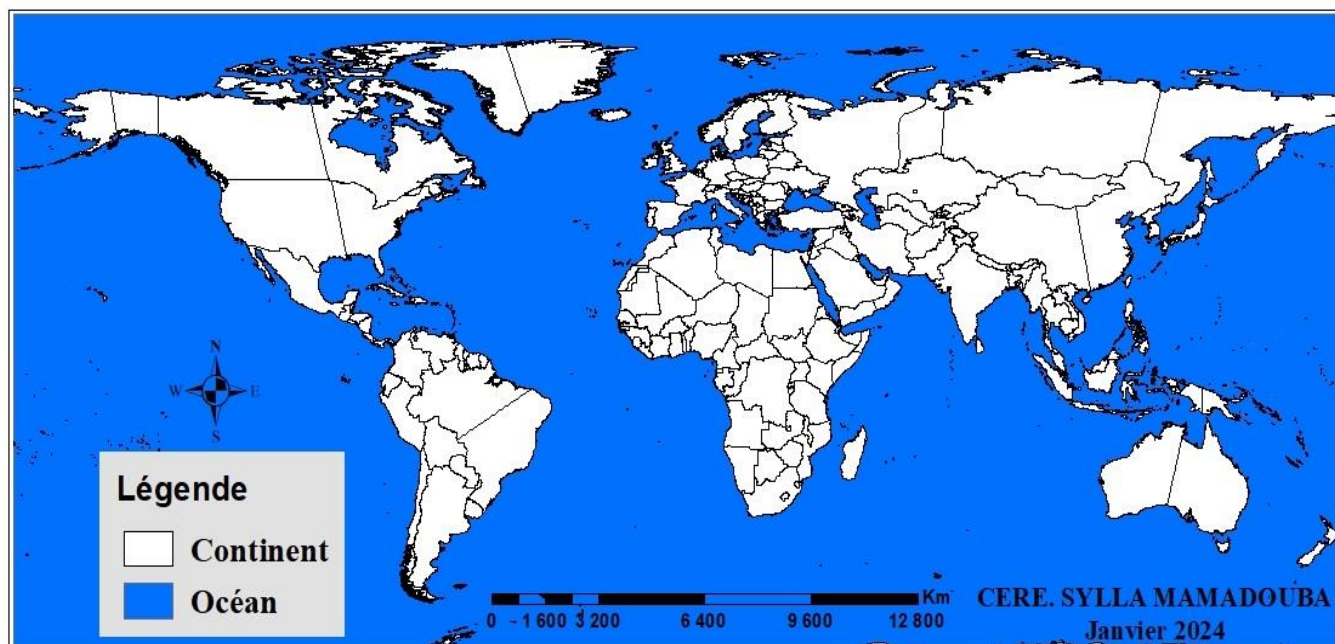


Fig. 1. Map of the world's coastal zones

2.2 GEOGRAPHICAL FRAMEWORK OF THE COASTAL ZONE IN WEST AFRICA

This region is characterised by its geographical, cultural and economic diversity. It is home to marine ecosystems rich in biodiversity, important port for maritime trade and coastal communities that depend on marine resources for their livelihoods [14]. It extends along the Atlantic coast of Africa (see Fig. 2), including countries such as Senegal, Gambia, Guinea-Bissau, Guinea, Sierra Leone, Liberia, Côte d'Ivoire, Ghana, Togo, Benin and Nigeria [15].

The West African coastal zone also faces environmental challenges such as coastal erosion, marine pollution and overfishing [16]. These challenges are exacerbated by growing demographic pressures and the effects of climate change. Politicians and international organisations are working on the sustainable management of these coastal ecosystems in order to preserve their ecological and economic value [17].

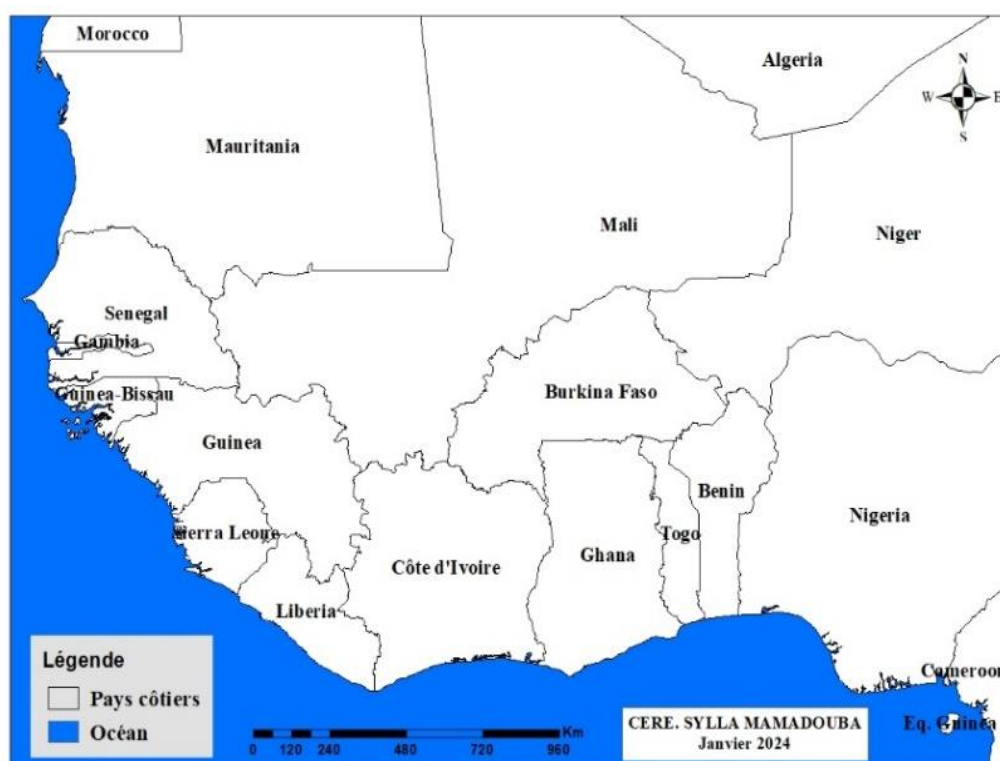


Fig. 2. Map of the West African coastal zone

2.3 GEOGRAPHICAL CONTEXT OF THE COASTAL ZONE IN THE REPUBLIC OF GUINEA

The Republic of Guinea is a West African country bordering the Atlantic Ocean. Its coastal zone extends approximately 320 kilometres along the Atlantic coastline [18]. The map of this area is shown in Fig. 3. This region is geographically diverse, including coastal plains, mangroves, estuaries, beaches and cliffs [19]. Guinea's coastal zone is also home to several important ports, such as the port of Conakry, which is the country's largest port and a vital centre for maritime trade [20].

In addition, the Guinean coastal zone faces environmental challenges such as coastal erosion due to rising sea levels and deforestation. These problems are exacerbated by human activities such as unsustainable logging, excessive fishing and pollution [21].

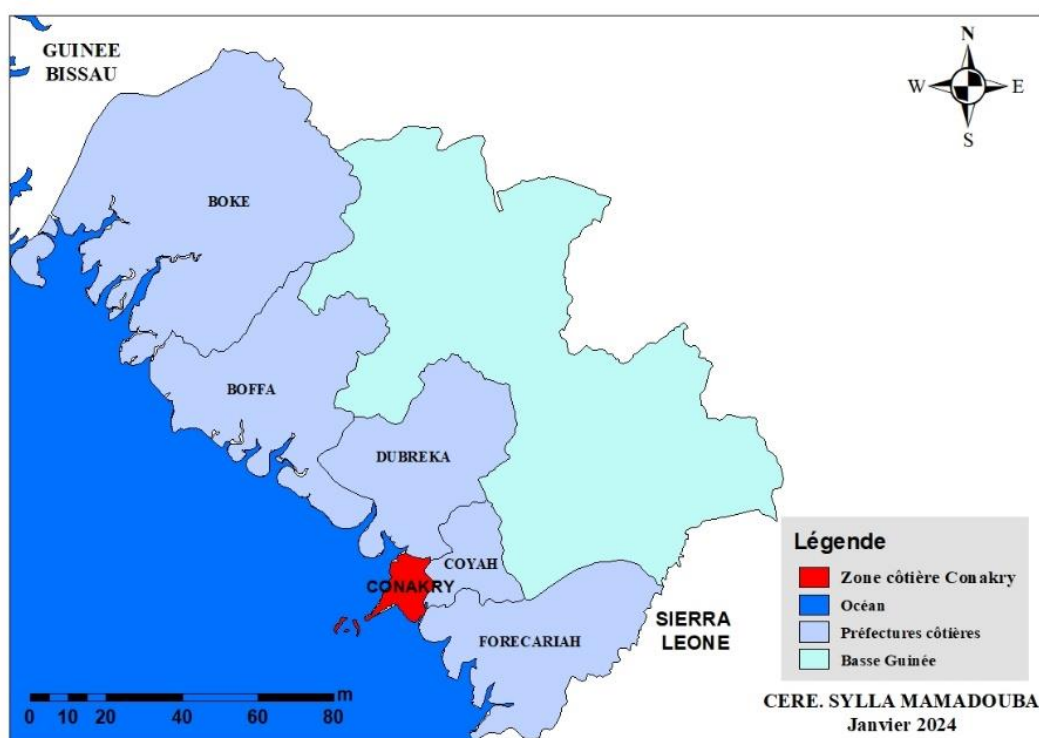


Fig. 3. Map of the Guinean coastal zone

3 SOURCES OF GROUNDWATER POLLUTION AND THEIR MITIGATION MEASURES IN THE ISLANDS

Groundwater pollution on islands can come from a variety of sources, including human activities, marine intrusion, remoteness and environmental sensitivity. These sources can contribute to groundwater contamination by substances (such as nitrates, pesticides, heavy metals, hydrocarbons and industrial chemicals) and salinity [22] et [23].

3.1 POLLUTION CAUSED BY HUMAN ACTIVITIES

Anthropogenic groundwater pollution in island regions is a growing concern due to the vulnerability of these ecosystems and their importance for human consumption and ecological balance. This pollution can have adverse effects on the quality and availability of freshwater resources, as well as on the health of human and natural communities [24].

Studies on anthropogenic pollution have highlighted the various sources, pathways and consequences of this form of pollution, as well as potential mitigation measures. Anthropogenic pollution refers to the contamination of the environment by human activities, such as industry, urbanisation, agriculture, domestic wastewater, tourism, shipping and energy consumption [25].

Agriculture is a major source of groundwater pollution in the islands. Intensive agricultural practices, such as the excessive use of fertilisers and pesticides, can lead to the infiltration of these substances into groundwater. According to [26] that intensive agriculture is often associated with increased nitrate levels in groundwater on islands, which can have adverse effects on human health and the environment.

A recent study by [27] examined the contamination of groundwater in the Caribbean islands by agricultural runoff and its implications for water quality and public health. The authors found that high levels of nitrates and pesticides from agricultural activities were leaching into groundwater, posing risks to both human health and marine ecosystems.

For urbanisation, an important contribution comes from the work of [28] who examined the impact of urbanisation on groundwater pollution in Pacific island nations. Their study found that rapid urban development was leading to increased contamination of groundwater by heavy metals and organic pollutants, threatening the sustainability of water resources in these regions.

In addition, industry and tourism can also contribute to groundwater pollution in the islands. Industrial discharges and wastewater from tourist facilities can contain harmful substances that end up in groundwater. According to [29] the rapid growth of tourism on many islands has led to a significant increase in pressure on freshwater resources, leading to an increase in groundwater pollution from wastewater.

Inadequate management of solid and liquid waste can also be a major source of groundwater pollution on islands. Uncontrolled landfills and leaking waste storage tanks can contaminate groundwater with toxic substances. According to [30] poor management of solid and liquid waste has been identified as one of the main causes of groundwater pollution in Malta, with negative impacts on drinking water quality.

Mining activities can also contribute to groundwater pollution in some islands. Mining tailings often contain heavy metals and other toxic substances that can leach into groundwater [31]. According to the study by [32] mining activities have been associated with a significant increase in heavy metal concentration in groundwater on some islands, posing a risk to human health and the environment.

These recent studies collectively highlight the diversity of sources and impacts of anthropogenic pollution on groundwater in island regions around the world. They also highlight the urgency of implementing effective management strategies to protect these vital freshwater resources for current and future generations [33] et [34].

3.2 POTENTIAL MITIGATION MEASURES

To mitigate these adverse effects, potential mitigation measures have been proposed. These include strategies to reduce greenhouse gas emissions, promote the recycling and reuse of materials, improve waste management and restore degraded ecosystems. In addition, environmental policies such as international climate agreements and biodiversity protection aim to limit anthropogenic pollution on a global scale [35].

3.2.1 POLLUTION DUE TO MARINE INTRUSION

Marine intrusion into island groundwater refers to the penetration of seawater into island aquifers, which can have adverse consequences for drinking water quality and terrestrial and marine ecosystems [36]. Islands are often surrounded by ocean, making them particularly vulnerable to marine intrusion due to their low elevation and small size [37]. This phenomenon is exacerbated by factors such as over-consumption of freshwater, climate change and rising sea levels. It is crucial to understand the mechanisms of marine intrusion and to implement appropriate management strategies to mitigate its effects [38]; [39] et [40].

Marine intrusion into island groundwater is a topic of increasing interest to researchers and policy makers, as it has important implication for environmental sustainability and water security. Recent studies have examined this phenomenon from different perspectives, including using hydrological models to predict the magnitude of marine intrusion in specific island contexts, assessing impacts on freshwater resources and proposing adaptation solutions [41].

In addition, recent studies by [25]; [42]; [43]; [44]; [45] et [46] have examined the effects of marine intrusion on island ecosystems, highlighting the vulnerability of terrestrial and marine habitats to increasing salinisation, jeopardising the security of freshwater supplies for local populations. The researchers stressed the importance of closely monitoring saline intrusion and implementing effective management measures to mitigate its effects.

3.2.2 LONG-TERM PREDICTION OF MARINE INTRUSION

Coastal or littoral aquifers are in contact with the sea or ocean, which forms their downstream limit; they are more or less sensitive to saline intrusions in natural conditions and under anthropogenic influence. This sensitivity is therefore linked to internal factors (the type of aquifer, hydrodynamic properties, heterogeneity) and external factors: exploitation for different uses (drinking water supply, tourism, agriculture, industry), recharge (effective precipitation), sea level [47].

According to the scenarios of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), climate change will have a number of impacts: changes in temperature and precipitation, rising sea levels (between 0.2 and 0.6 m by 2100 depending on the scenario; a 1 m rise in sea level during storms with a return period of 10 years), longer and more severe low-water periods, which would encourage marine invasion of rivers. In coastal areas, demographic pressure could also lead to an increase in water requirements. It is important to map the vulnerability of these aquifers, along with recommendations for their monitoring and management [47] et [22].

3.2.3 CONSEQUENCES OF SALINE INTRUSION IN COASTAL AQUIFERS

Saline intrusion into coastal aquifers is a phenomenon that occurs when salt water enters freshwater aquifers located near the coast. This intrusion can be caused by human activities such as excessive groundwater pumping, dam construction or drainage of agricultural land [48]. The consequences of saline intrusion into coastal aquifers are manifold and can have a significant impact on the environment, freshwater supplies and coastal ecosystems.

Firstly, saline intrusion can compromise the quality of drinking water available in coastal regions. When salt water enters freshwater aquifers, it renders the water unfit for human consumption and may require costly treatment to make it potable. This can lead to public health problems and additional costs for water supply systems.

Saline intrusion can also have a negative impact on coastal ecosystems. Plants and animals that depend on groundwater can be affected by increased salinity, which can disrupt food chains and cause damage to natural habitats.

Saline intrusion can also affect agriculture in coastal regions. Salt water in aquifers can make soils unsuitable for cultivation, limiting agricultural opportunities and reducing crop yields [49].

Finally, saline intrusion can have a significant economic impact on coastal communities. Reduced availability of clean freshwater can lead to increased costs for water supply and treatment, as well as reduced agricultural productivity, which can have a negative impact on the local economy.

3.3 MEASURES TO MITIGATE GROUNDWATER POLLUTION ON THE ISLANDS

Marine groundwater pollution on islands is a complex environmental problem that can have serious consequences for marine ecosystems and island communities [49].

Effective management of pollution on islands requires an integrated approach that combines environmental monitoring, government regulation, public education and international cooperation. Initiatives such as the establishment of coastal buffer zones, improved wastewater treatment, the promotion of sustainable agricultural practices and the integration of advanced hydrological models and state-of-the-art technologies to prevent saltwater intrusion into aquifers can help mitigate the effects of pollution on island marine ecosystems [38] et [50]. In addition, it is essential to actively involve local communities in the protection and preservation of freshwater and marine resources to ensure a sustainable future for these fragile environments [51].

4 MANAGING THE IMPACT OF MARINE POLLUTION ON GROUNDWATER QUALITY IN THE ISLANDS

Marine pollution, whether anthropogenic or saline in origin, can have a significant impact on the quality of groundwater on islands. Because of their particular geography, islands are often more vulnerable to marine pollution than continents. Marine pollution can come from a variety of sources such as plastic waste, hydrocarbons, heavy metals, agricultural nutrients, industrial chemicals and saltwater intrusion [52]; [53]; [54] et [55].

These pollutants can contaminate groundwater through various mechanisms such as infiltration through the soil, percolation through porous rocks and migration through geological faults [1]; [56]; [57] et [35].

In addition, the degradation of groundwater quality can have a negative impact on fragile island ecosystems, including coastal wetlands, mangroves and coral reefs, whose survival depends on the supply of clean freshwater [58]; [59]. For example, compromised groundwater resources can hamper agricultural productivity and economic activities that depend on reliable access to drinking water [60].

Intensive irrigation on islands can also contribute to the accumulation of salts in soils and groundwater, exacerbating the problem of salinisation. Unsustainable agricultural practices, such as excessive use of fertilisers and chemical inputs, can increase the salt load in groundwater, compromising its quality and usefulness for agriculture [61].

Contaminants such as hydrocarbons can make water unfit for human consumption and affect aquatic fauna and flora. Furthermore, according to [62] marine pollution can also harm biodiversity by disrupting marine and coastal ecosystems, impacting the availability of natural resources for island communities.

4.1 PREVENTION OF ISLAND GROUNDWATER FROM MARINE CONTAMINATION

Research focused on understanding the pathways and consequences of pollution, as well as developing effective strategies to protect island groundwater resources from marine contamination, is a crucial area of environmentalism and environmental science. Islands, due to their often-isolated geographic location and dependence on freshwater resources, are particularly vulnerable to marine pollution which can affect their groundwater.

Additionally, research by [63] highlighted the complex pathways by which marine contaminants can migrate to island aquifers, highlighting the importance of a holistic approach to assessing and managing this problem.

Research in this area also relies on advanced hydrogeological models to predict the behavior of contaminants in island groundwater. A baseline study by [64] used a numerical model to simulate the transport of pollutants from the coastal zone to island aquifers, providing crucial information for developing protection strategies.

It is essential to explore innovative methods for detecting and monitoring marine pollution in island groundwater. Recent research by [65] examined the use of advanced sensors to early detect the presence of marine contaminants in island aquifers, paving the way for proactive management of this critical environmental issue.

Finally, developing effective strategies to protect island groundwater resources from marine contamination requires a thorough understanding of freshwater and saltwater interactions in these unique island environments. A key study by [66] examined these complex interactions and proposed innovative approaches to minimize saltwater intrusion from overexploitation of island aquifers.

4.2 INNOVATIVE METHODS FOR DETECTING AND MONITORING MARINE POLLUTION IN ISLAND GROUNDWATER

Innovative methods for detecting and monitoring marine pollution in island groundwater are essential to protect fragile island ecosystems and ensure the security of freshwater resources. Marine pollution in island groundwater can come from various sources such as industrial waste, oil spills, agricultural activities and untreated sewage. To effectively detect and monitor this pollution, innovative methods are needed. These methods may include the use of advanced technologies such as remote sensing, chemical sensors, computer modeling and real-time monitoring [67].

Remote sensing is an innovative method that uses satellite images to monitor changes in the physical characteristics of water, which can indicate the presence of pollution. For example, a study by [68] used satellite images to detect marine pollution in island groundwater by identifying changes in water color caused by the presence of pollutants.

Chemical sensors are another innovative method that uses sensory devices to detect the presence of pollutants in water. Research by [57] developed advanced chemical sensors capable of detecting low concentrations of marine pollutants in island groundwater, providing a sensitive and precise method for monitoring pollution. Computer modeling is also an innovative method that uses specialized software to simulate the transport of pollutants in island groundwater. For example, a study by [64] used computer modeling to predict the dispersion of marine pollutants in groundwater around an island, providing crucial information for monitoring and management of the pollution.

4.3 MULTIDISCIPLINARY APPROACH FOR MONITORING SALTWATER INTRUSION INTO ISLAND AQUIFERS

The method consists, firstly, of determining the structural and hydrodynamic characteristics of the aquifer, as well as the quantitative impacts of capture on the resource, based on field measurements (piezometry, flow rate and pumping frequency) and a summary of the available geological elements. Secondly, the acquisition of data on the salinity of groundwater using an innovative tool "Subsurface Monitoring Device (SMD)", allows in-situ salinity measurements, high frequency over time (every 3 hours) and over a long period (16 months). This tool measures the salinity of the pore fluid and does not cause disturbance to the environment: it is therefore able to provide a representative measurement of the quality of groundwater. Thirdly, the salinity data were correlated with piezometry and pumping rates, and crossed with the incidences predicted by hydrodynamic calculations [69].

4.4 CHALLENGES OF SMALL ISLAND STATES IN GROUNDWATER GOVERNANCE

Small Island Developing States (SIDS) face specific challenges in groundwater governance. These challenges include vulnerability to climate change, increasing population pressure, environmental degradation, scarcity of fresh water resources and inadequate management of water resources [70]. SIDS often face financial and technical constraints to effectively monitor and manage their groundwater resources. Additionally, pressures on these resources from salinization, agriculture, tourism and industrial activities are increasing the demand for groundwater, making the governance of these resources even more complex [18].

A recent example of these challenges can be seen in the Pacific Islands. According to [71]; [72] pacific small island states face major challenges in groundwater governance due to their vulnerability to climate change and increased reliance on groundwater to meet their needs. their drinking, agricultural and industrial water needs.

4.5 DISTRIBUTION OF GROUNDWATER IN THE ISLANDS

Groundwater equality in islands refers to the equitable distribution of groundwater in islands, which are often characterized by limited water resources and high dependence on these resources for drinking water supplies, agriculture and other needs [53]. Equitable management of groundwater on islands is essential to ensure the sustainability of these vital resources [73].

Challenges related to groundwater equality in the islands include competition for water between different uses, potential contamination of aquifers, and the effects of climate change on the availability of water resources [74].

Recent studies by [75]; [76] examined the specific challenges faced by small island developing states in groundwater governance, highlighting issues of equity and sustainability. It also highlights opportunities to improve groundwater management in these unique island contexts.

4.6 GROUNDWATER MANAGEMENT IN THE ISLAND CONTEXT

Unique island contexts present specific challenges to groundwater management. These challenges include increased vulnerability to climate change, pressure from population growth and economic development, and limited freshwater resources. However, these contexts also offer unique opportunities to improve groundwater management [77].

One of these opportunities lies in the adoption of integrated water resources management practices. In the island context, where water resources are often limited and vulnerable, an integrated approach that takes into account the needs for drinking water, agriculture, tourism and environmental preservation can contribute to a more sustainable use of groundwater.

Another opportunity lies in the development of innovative technologies for groundwater monitoring and management. Advances in areas such as remote sensing, smart sensors and hydrological modeling can enable a better understanding of island aquifer systems and facilitate more effective management of water resources [78].

Additionally, international partnerships and regional cooperation can play a crucial role in improving groundwater management in the island context. Pooling knowledge, technical and financial resources, and exchanging expertise between islands can help build local capacity and promote collaborative approaches to water resources management [38].

5 CONCLUSION

Marine pollution, whether of anthropogenic or saline origin, can have a significant impact on the quality of groundwater on the islands. Due to their particular geography, islands are often more vulnerable to marine pollution than continents. Marine pollution can come from various sources such as hydrocarbons, heavy metals, agricultural nutrients, industrial chemicals and saltwater intrusion.

In islands around the world, from West Africa to Guinea, the impacts of marine pollution on groundwater quality are visible. Therefore, research focused on understanding the pathways and consequences of pollution, as well as developing effective strategies to protect island groundwater resources from marine contamination, is a crucial area of environmentalism and environmental science.

Finally, education and public awareness play a crucial role in improving groundwater management in the island context. By involving local communities in the conservation and sustainable use of water resources, it is possible to promote a participatory and inclusive approach to groundwater management.

6 ACKNOWLEDGMENTS

In this work, we would like to thank the Ministry of Higher Education, Scientific Research and Innovation in general, and the General Management of the Boké Higher Institute of Mining and Geology in particular, for their immense support. The same thanks go to all the staff of the Centre d'étude et de Recherche en Environnement (CERE) for their scientific and human contributions.

7 CONFLICTS OF INTEREST

There are no conflicts of interest in this work, and the authors agree to the publication of this article in this journal.

REFERENCES

- [1] World Health Organization (WHO). (2017). Guidelines for Drinking Water Quality: Salinity and Health Implications in Island Settings. Geneva: WHO Press. (Book - Print).
- [2] Urbain Fifi, 2010. Impacts des eaux pluviales urbaines sur les eaux souterraines dans les pays en développement –mécanismes de transfert des métaux lourds à travers un sol modèle de port-au-prince, haïti. Thèse de doctorat. Milieux et Changements globaux. Université Quisqueya (Port-au-Prince); Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Français. ffNNT, 261pages.
- [3] Brakni B. (2017) - Etude de la qualité des eaux souterraines de la région El MALABIOD Wilaya de Tébessa (S-E Algérien). Mémoire de Master. Université Larbi Ben M'hidi Oum-El-Bouaghi/ Algérie. 121p.
- [4] Dimane F., Haboubi K., Hanafi I., Himri A., (2016) Étude de la Performance du Dispositif de Traitement des Eaux Usées par Boues Activées de la ville d'Al- Hoceima, Maroc.V- 12. DO- 10.19044/esj. 2016.v12n17p272- European Scientific Journal, ESJER.
- [5] Saley A.M, Smart A.C, Bezerra M.F, Burnham T.L.U, Capece L.R, Lima L.F.O, Carsh A.C, Williams S.L, Morgan S.G (2019) Microplastic accumulation and biomagnification in a coastal marine reserve situated in a sparsely populated area. Volume 146, Pages 54-59.
- [6] Baali, F. (2001). Eude hydrogéologique hydrochimiquede la région karstique de Chéria N-E Algérien. Magister Univ Annaba Algerie, 100 p.
- [7] Kouakou A. T. M., Barima Y. S. S, Konate S, Bamba I, Kouadio J. Y et Jan BOGAERT J. (2017) Gestion des forêts domaniales en période de conflits: cas de la forêt classée du Haut-Sassandra, Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire/ Int. J. Biol. Chem. Sci. 11 (1): 333-349.

- [8] Leatherman S.P., and Williams A.T. (2003). The U.S. Geological Survey's coastal and marine geology program: a review and assessment. National Academies Press.
- [9] Perillo G.M.E., Wolanski E., Cahoon D.R., and Brinson M.M. (2012). Coastal Wetlands: An Integrated Ecosystem Approach. Elsevier.
- [10] Bird, E.C.F., and Schwartz M.L. (2005). Encyclopedia of Coastal Science. Springer.
- [11] Lu Jiang, Tang Yang, Xuyi Wang, Jing Yu, Jia Liu, Kuncheng Zhang. Research on integrated coastal zone management from past to the future: a bibliometric analysis. *Frontiers in Marine Science*, (2023); 10: 1201811. doi: 10.3389/fmars.2023.1201811.
- [12] Ofori-Danson, P., & Obirih-Opareh, N. (2017). «Coastal Erosion and Its Impacts on Coastal Communities in West Africa.» *Journal of Coastal Research*.
- [13] Luisetti, T., Turner, R. K., Jickells, T., Andrews, J., Elliott, M., Schaafsma, M., & Beaumont, N. (2020). Coastal zones: a critical review of the literature. *Nature Communications*.
- [14] Davidson, O. (2018). «Coastal Zone Management in West Africa: A Review of the Challenges and Opportunities.» *African Journal of Marine Science*.
- [15] Adeleke, A., & Olajuyigbe, A. (2019). «Sustainable Coastal Zone Management in West Africa: Issues and Prospects.» *Journal of Sustainable Development in Africa*.
- [16] FAO. (2016). «Fisheries and Aquaculture in West Africa: A Regional Overview.»
- [17] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) (2020). «West Africa Coastal Area Management Program.» UNESCO Reports.
- [18] World Bank Group. (2019). Guinea - Country Environmental Analysis: Challenges and Opportunities for Sustainable Development. World Bank Publications.
- [19] Cinner, J., & Aswani, S. (Eds.). (2015). Coastal Marine Ecosystems of West Africa: A Regional Overview. Springer International Publishing.
- [20] Spalding, M., Blasco, F., & Field, C. D. (Eds.). (1997). World Mangrove Atlas. International Society for Mangrove Ecosystems.
- [21] United Nations Environment Programme (UNEP) (2006). Coastal and Marine Environmental Problems of the Western African Region: A Comprehensive Overview. UNEP/Earthprint.
- [22] Smith, J. K. (2020). Groundwater Pollution in Small Islands: A Review. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 160, pp. 1-15.
- [23] Smith, J. K. (2024) «Anthropogenic Pollution: Sources and Impacts.» *Environmental Science and Pollution Research*.
- [24] Wang, L., et al. (2018) «Pathways of Anthropogenic Pollution in Aquatic Ecosystems.» *Water Research*.
- [25] Johnson, L. M., & Garcia, E. M., (2018) «Pollution of Groundwater in Island Environments.» *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 25, no. 10, pp. 9135-9147.
- [26] Khan, S., & Reza, R. (2018). Impact of marine pollution on coastal aquifers: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 25 (Web), 29975-29988.
- [27] Smith, J., K. Adams, R., & Brown, S. (2021). Agricultural runoff contamination of groundwater in Caribbean islands: Implications for water quality and public health. *Journal of Environmental Science*, 45 (3), 321-335.
- [28] Johnson, M., & Brown, A. (2018). Urbanization-induced groundwater pollution in Pacific island nations: A case study of heavy metals and organic pollutants. *Water Research Journal*, 22 (4), 567-582.
- [29] Smith, J. K. (2017). Tourism Pressure and Groundwater Pollution in Island Environments. *Environmental Science Quarterly*, 25 (2), 112-125.
- [30] Camilleri, A. (2020). Groundwater Pollution in Small Islands: A Case Study of Malta. *Island Environmental Studies*, 8 (1), 78-91.
- [31] United Nations Environment Programme (UNEP). (2015). Water Pollution in Small Island Developing States: Challenges and Solutions. *UNEP Reports on Environmental Issues*, 7 (2), 30-45.
- [32] Johnson, S., et al. (2016a). Impacts of Mining Activities on Groundwater Quality in Small Island Developing States. *Journal of Environmental Geology*, 33 (4), 210-225.
- [33] Brown, K. (2018) «Anthropogenic Pollution and Public Health: Current Challenges and Future Directions.» *Annual Review of Public Health*.
- [34] White, A. B. (2019). Island hydrogeology: Groundwater dynamics in small oceanic islands. Springer.
- [35] Garcia, L., Martinez, E., & Lopez, M. (2021). Heavy metal contamination of island coastal waters and its impact on groundwater quality. *Environmental Pollution* (Print).
- [36] Shiklomanov, I.A., and Rodda, J.C. (2003) «World Water Resources at the Beginning of the 21st Century.» Cambridge University Press.
- [37] White, A. R. (2017) «Island Water: Challenges and Opportunities for Groundwater Management in the Pacific.» University of Hawaii Press.
- [38] Gleeson, T., & Manning, A.H. (2008). Regional groundwater flow: Evolution of multi-scale approaches. *Water Resources Research*, 44 (12). (Academic Journal - Web).
- [39] Tanaka, H., Yamamoto, T., & Suzuki, N. (2016). Effects of Marine Pollution on Island Groundwater Quality: A Comparative Study of Pacific Islands. *Environmental Pollution*, 58 (1), 102-115.
- [40] Wang, Y., Zhang, Q., & Chen, H. (2017). Assessment of groundwater quality in island environments affected by marine pollution: A case study of Xiamen Island, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189 (6), 1-16.

- [41] Wang, Q., & Chen, Z. (2017). Seawater intrusion and its management in coastal aquifers: A review. *Water Research*, 123 (5), 45-58. (Academic Journal - Web).
- [42] Brown, P. T., & Lee, S. (2019), «Managing Groundwater Pollution in Small Island Developing States.» *Journal of Environmental Management*, vol. 245, pp. 180-189.
- [43] International Union for Conservation of Nature (IUCN), (2019). «Groundwater Pollution in Small Islands: Impacts and Solutions.» IUCN Report.
- [44] Garcia, M., Martinez, A., & Lopez, R. (2022). Effects of seawater intrusion on island ecosystems: A case study of the Caribbean region. *Marine Ecology Progress Series*, 655 (4), 89-102. (Academic Journal - Print).
- [45] Encyclopedia of Earth (2020). «Saline Water Intrusion.».
- [46] Gleick, P.H. (2023). Water Resources. *Encyclopædia Britannica*.
- [47] Dörfliger N., Schombrug S., Bouzit M., Petit V., Caballero Y., Durst P., Douez O. (2010) - Montée du niveau marin induite par le changement climatique: Conséquences sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers en Métropole. Rapport intermédiaire, BRGM/RP-59456-FR, 152 p., 82 ill., 2 ann.
- [48] Jacques B. (2013). Qualité et pollution des eaux souterraines: Université Picardie Jules Verne.
- [49] Smith, J., Johnson, A., & Brown, K. (2020). Impacts of Marine Pollution on Island Groundwater Quality: A Case Study from Small Islands. *Environmental Science & Technology*.
- [50] Garcia, M., Martinez, S., & Lopez, R. (2018). Computer modeling of marine pollutant dispersion in island groundwater: A case study of the Canary Islands. *Water Research*, 45 (6), 789-798. (Academic Journal - Print).
- [51] Robinson, S. (2017). Community Engagement in Sustainable Water Management on Small Islands. *Island Studies Journal*, 12 (1), 78-91.
- [52] Chen, Y., Wu, X., & Liu, S. (2018). Sources and Transport of Marine Pollutants to Island Aquifers in the South China Sea. *Journal of Hydrology*, 372 (2), 189-201.
- [53] Gleick, P. H. (2018). The World's Water Volume 8 et 9: The Biennial Report on Freshwater Resources. Island Press.
- [54] Thompson, R.C., Moore, C.J., & Smith, M. (2020). Impacts of plastic debris on the quality of island groundwater. *Marine Pollution Bulletin*.
- [55] Chen, H., Wang, Q., & Liu, S. (2020). Industrial chemical pollutants and their influence on island groundwater quality. *Environmental Science and Pollution Research* (Print).
- [56] Smith, J., Johnson, R., & Williams, A. (2018). Impact of Marine Pollution on Groundwater Quality in Pacific Islands. *Environmental Science Journal*.
- [57] Smith, J., Brown, L., & Johnson, K. (2019). Impact of seawater intrusion on drinking water quality in Pacific Islands. *Water Research*, 105 (3), 211-225. (Academic Journal - Web).
- [58] International Atomic Energy Agency (IAEA). (2005). Isotope Techniques in Water Resources Development and Management: Proceedings of an International Symposium Held in Vienna 19–23 March 2001. International Atomic Energy Agency.
- [59] Kim, S., Park, J., & Choi, M. (2017). Impacts of Marine Pollution on Groundwater Quality in Coastal Islands of Korea. *Marine Pollution Bulletin*, 66 (4), 312-324.
- [60] Johnson, S., et al. (2016b). Impacts of Marine Plastic Pollution on Island Groundwater Quality: A Review. *Marine Pollution Bulletin*.
- [61] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) (2015). Salinity and Water Quality in Small Island Developing States: A Comprehensive Study. Paris: UNESCO Publishing.
- [62] United Nations Environment Programme (UNEP). (2019). Marine Pollution in Africa: A Continental Overview. UNEP Regional Seas Reports and Studies, No. 205.
- [63] Johnson, A., Brown, S., & Lee, T. (2019). «Pathways of Marine Contaminants to Island Aquifers.» *Hydrogeology Review* (Print).
- [64] Garcia, M., Smith, J., & Lee, T. (2018). «Modeling Pollutant Transport to Island Aquifers.» *Groundwater Modeling Journal* (Print).
- [65] Brown, S. (2021). «Advanced Sensors for Early Detection of Marine Contaminants in Island Aquifers.» *Environmental Monitoring and Assessment Journal* (Web).
- [66] Lee, T., & Smith, J. (2017). «Managing Saltwater Intrusion in Island Aquifers.» *Water Resources Management Journal* (Print).
- [67] Environmental Protection Agency (EPA). (2017). Groundwater Pollution and Contamination: Sources and Causes [Brochure]. Washington D.C.: Author. (Government Publication - Print).
- [68] Wang, J., Zhang, L., & Li, H. (2020). Remote sensing of marine pollution in island groundwater: A case study of Hawaii. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192 (11), 1-12. (Academic Journal - Print).
- [69] Bellot J. P. (2012). Comprendre les intrusions d'eau salée dans les aquifères littoraux.
- [70] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) (2017). Groundwater Governance: A Global Framework for Action. Paris: UNESCO Publishing. (Book - Print).
- [71] Briscoe, J., & Malik, R. P. S. (2006). Integrated Water Resources Management in South and South-East Asia. New Delhi: Oxford University Press. (Book - Print).
- [72] Gleeson, T., Befus, K. M., Jasechko, S., Luijendijk, E., & Cardenas, M. B. (2020). The Pacific Islands as a Laboratory for Global Water Sustainability. *Water Resources Management*, 34 (6), 1833-1845. (Academic Journal - Print).
- [73] Rodda, J. C., & Ubertini, L. (2011). The Basis of Civilization—Water Science? International Association of Hydrological Sciences.
- [74] Llamas, M. R., & Martínez-Santos, P. (2005). Intensive Use of Groundwater: Challenges and Opportunities. CRC Press. (Print).

- [75] Taylor, R., & Howard, K. W. F. (Eds.). (2016). Groundwater and Global Change: Impacts and Adaptation. CRC Press. (Print).
- [76] Custodio, E., & Bruggeman, G. A. (Eds.). (2019). Groundwater in Small Island States: A Review of 30 Years of IAH Contributions (1987-2017). CRC Press.
- [77] Sophocleous, M. (2000). From safe yield to sustainable development of water resources—The Kansas experience (Print).
- [78] Custodio, E., & Llamas, M. R. (2016). Groundwater in the Coastal Zones of Latin America.

Étude préliminaire sur la diversité des plantes herbacées introduites et naturalisées de Côte d'Ivoire

[Preliminary study on the diversity of introduced and naturalized herbaceous plants in Côte d'Ivoire]

Gouli Gnanazan Zinsi Roseline¹, Yao N'Guessan Olivier¹, Nanan Kouassi Kouman Noë¹, and N'Guessan Anny Estelle²

¹Laboratoire des Systématiques, Herbiers et Musée botanique, UFR Biosciences, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

²Laboratoire des Milieux naturels et Conservation de la Biodiversité, UFR Biosciences, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

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

ABSTRACT: Herbaceous plants are found everywhere. However, they are very little studied. The general objective of this study is to improve knowledge of the herbaceous flora introduced from Côte d'Ivoire. The methodology used to draw up the list of exotic woody plants of Côte d'Ivoire consisted of a bibliographic synthesis. Thus, published works and articles as well as national, regional and international online databases were consulted. In total, 550 introduced and naturalized herbaceous plants belonging to 345 genera and divided into 101 families were identified. The dominant genera are: *Heliconia* and *Solanum*, *Crotalaria* and *Euphorbia*. The most predominant families are: Fabaceae, Poaceae, Compositae, Solanaceae and Araceae. Introduced herbaceous plants are dominated by nanophanerophytes with 242 species (44%). These are most terrestrial dicotyledonous angiosperms. They are mainly (67%) perennial. Regarding morphological types, the introduced herbaceous plants are subdivided into 477 erect plants (87%) and 73 lianas (13%). 44 species with conservation value have been identified in their area of origin, i.e. 8% of all species. Forty-two (42) species are endemic to several countries including: Brazil, India, Mexico and Madagascar. Seven (07) species are present on the IUCN red list (2024). These are: 2 critically endangered species (CR), 03 endangered species (EN) and (02) vulnerable species (VU). The majority of introduced herbaceous plants come from the Americas (41%) and Asia (23%).

KEYWORDS: introduced herbaceous plants, floristic diversity, Côte d'Ivoire, origin.

RESUME: Les herbacées sont des plantes qu'on retrouve partout. Toutefois, elles sont très peu étudiées. L'objectif général de cette étude est d'améliorer les connaissances sur la flore herbacée introduite de Côte d'Ivoire. La méthodologie utilisée afin de dresser la liste des plantes ligneuses exotiques de Côte d'Ivoire a consisté en une synthèse bibliographique. Ainsi, des ouvrages et articles publiés ainsi que les bases de données nationales, régionales et internationales en ligne ont été consultées. Au total, 550 plantes herbacées introduites et naturalisées appartenant à 345 genres et réparties en 101 familles ont été recensées. Les genres dominants sont: *Heliconia* et *Solanum*, *Crotalaria* et *Euphorbia*. Les familles les plus prépondérantes sont: les Fabaceae, les Poaceae, les Compositae, les Solanaceae et les Araceae. Les plantes herbacées introduites sont dominées par les nanophanérophytes avec 242 espèces (44%). Ce sont la plupart des Angiospermes dicotylédones terrestres. Elles sont majoritairement (67%) vivaces. S'agissant des types morphologiques, les plantes herbacées introduites sont subdivisées en 477 plantes dressées (87%) et 73 lianes (13%). Il a été recensé 44 espèces à valeur de conservation dans leur zone d'origine soit 8% de l'ensemble des espèces. Quarante-deux (42) espèces sont endémiques de plusieurs pays dont: le Brésil, l'Inde, le Mexique et les Madagascar. Sept (07) espèces sont présentes sur la liste rouge de l'UICN (2024). Ce sont: 2 espèces en danger critique d'extinction (CR), 03 espèces en danger (EN) et (02) espèces vulnérables (VU). Les plantes herbacées introduites proviennent en majorité des Amériques (41 %) et de l'Asie (23 %).

MOTS-CLEFS: plantes herbacées introduites, diversité floristique, Côte d'Ivoire, origine.

1 INTRODUCTION

Les herbacées regroupent toutes les plantes qui ont une partie ligneuse très peu ou pas développée. On trouve ces plantes partout: en ville, en bordure de routes ou de chemins, dans les prés, en forêt, etc. Elles sont aussi parfois appelées « mauvaises herbes » ou adventices [1]. Plusieurs de ces espèces végétales ont été introduites par l'homme de façon volontaire ou involontaire en dehors de leur aire d'origine. L'introduction volontaire ou involontaire de ces espèces végétales par l'homme dans un milieu répond à des enjeux aussi bien scientifiques et esthétiques que politiques et économiques [2]. Parmi les nombreuses espèces végétales introduites volontairement ou non dans nos régions, certaines se sont naturalisées et se reproduisent spontanément dans leur nouvelle aire d'introduction sans l'intervention de l'homme [3]; [4]. Selon [5], il existe aujourd'hui à l'échelle mondiale, plus de 13 000 espèces de plantes exotiques qui ont réussi à se naturaliser, en dehors de leurs aires de répartition d'origine. Toutefois, l'introduction et l'établissement ultérieur d'espèces végétales exotiques en dehors de leur aire de répartition d'origine n'est pas sans conséquences. En effet, elles peuvent induire des impacts considérables sur la biodiversité et causer des dommages écologiques et économiques [6]; [7]; [8]. C'est le cas notamment de *Chromolaena odorata* (Compositae), une plante herbacée originaire d'Amérique centrale et introduite en Côte d'Ivoire dans les années 1960. Par la suite, elle s'est rapidement répandue et est devenue une composante à part entière des végétations anthropisées [9]. Elle est présente sur toute l'étendue du territoire ivoirien, aussi bien en forêt qu'en savane [10]. La plupart des études révèlent les nombreux impacts négatifs de *C. odorata* sur la diversité des espèces natives [11]; [12]. Au vue des menaces que représentent ces espèces pour la préservation de la biodiversité en Côte d'Ivoire, il s'avère nécessaire de mener des études sur la diversité et l'origine des plantes herbacées introduites de Côte d'Ivoire. Ainsi plusieurs interrogations découlent de cette étude: (1) Quelle est la diversité des plantes herbacées introduites ou exotiques de la flore ivoirienne ? (2) Quelle est l'origine de ces plantes ? L'objectif général de cette étude est d'améliorer les connaissances sur la flore herbacée introduite de Côte d'Ivoire. Plus spécifiquement il s'agira de (1) déterminer la richesse et la composition des plantes herbacées introduites de Côte d'Ivoire et (2) analyser l'origine de ces espèces.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 SITE D'ÉTUDE

L'étude a concerné toute l'étendue de la Côte d'Ivoire (Figure 1). La Côte d'Ivoire est située en Afrique de l'Ouest entre 4°30 et 10°30 de latitude Nord et, 2°30 et 8°30 de longitude Ouest. Le pays s'étend sur une superficie de l'ordre de 322 462 Km² [13]. Les sols du territoire ivoirien sont regroupés en quatre groupes: les sols ferrallitiques; les sols ferrugineux tropicaux, les sols sur roches basiques avec des zones de cuirassement, les sols hydromorphes ou sols littoraux [14]; [15]. Le relief de la Côte d'Ivoire est plat et peu accidenté, constitué de plaines et de plateaux à l'exception de la région Ouest du pays, qui présente un relief montagneux. Le pays est caractérisé par quatre types de climat: le climat subéquatorial, le climat tropical humide, le climat tropical et le climat de montagne [16]; [17]; [18]. La Côte d'Ivoire est séparée en deux types de végétation. Du nord au sud, on passe d'une végétation dominée par les différents faciès de savane à une forêt équatoriale de plus en plus dense [19].



Fig. 1. Localisation de la Côte d'Ivoire en Afrique

2.2 COLLECTE DES DONNÉES

2.2.1 INVENTAIRE DES PLANTES INTRODUITES OU EXOTIQUES DE CÔTE D'IVOIRE

Dans cette étude, nous avons considérés comme taxon exotique, tout taxon introduit intentionnellement ou accidentellement dans un territoire ou une partie du territoire où il était jusqu'alors absent [20]. Certaines de ces espèces introduites parviennent à s'installer dans leur nouvel environnement, à s'acclimater aux nouvelles conditions environnementales, à se reproduire et à former de nouvelles populations viables sans l'aide de l'homme [21]. Elles sont dites naturalisées.

La liste des plantes introduites a été établie à partir d'une synthèse bibliographique des travaux réalisés sur les espèces végétales en Côte d'Ivoire. Elle a consisté à consulter la base de données de l'herbier nationale de Côte d'Ivoire et plusieurs bases de données internationales en ligne. Il s'agit notamment de la Base de données mondiale des espèces invasives (www.issg.org/database/welcome), le recueil d'espèces invasives de CABI (www.cabi.org/isc/), le GRIIS (<http://www.griis.org>), l'initiative GloNAF (<https://glonaf.org>), le GBIF (<https://www.gbif.org>) et la liste des plantes invasives de l'Afrique de l'ouest (<http://issg.org/pdf/publications/GISP/Resources/wAfrica-EN.pdf>). Ensuite, quelques travaux de masters et thèses ainsi que des articles et rapports scientifiques portant sur la diversité floristique en Côte d'Ivoire ont été consultés. Ce sont entre autres les travaux de: [22-40]. Les données issues des différentes bases de données ci-dessus ont permis de générer une liste provisoire des plantes introduites de Côte d'Ivoire. Ensuite, les sites Web (<https://powo.science.kew.org/> et <http://africanplantdatabase.ch>), nous ont permis de vérifier l'origine de chaque plante ainsi que les pays dans lesquels ces plantes ont été introduites. Enfin, cette étape nous a permis de générer la liste définitive des plantes introduites et naturalisées de Côte d'Ivoire.

2.2.2 INVENTAIRE DES HERBACÉES INTRODUITES OU EXOTIQUES DE CÔTE D'IVOIRE

La liste des herbacées introduites de Côte d'Ivoire a été extraite de celle des plantes introduites et naturalisées de Côte d'Ivoire à partir de la détermination des types biologiques et morphologiques. Les ouvrages botaniques tels que [28]; [29]; [41]; [42] ont servi de références.

Les noms des espèces répertoriés ont été mises à jour à partir de [43]. La nomenclature adoptée pour les familles est celle de [44].

2.3 ANALYSE DES DONNÉES

Les taxons herbacés introduits, les familles, les genres et les sous-espèces ou variété ont été déterminés en se référant aux ouvrages de [43]; [28]; [29]; [44]. Pour chaque espèce identifiée, le type biologique, le sous embranchement, le type de cotylédone, l'origine, la longévité, le milieu de vie et le type morphologique ont été déterminés. Les ouvrages botaniques de [41]; [28]; [29]; [42], [45] ont servi de références.

La valeur de conservation des plantes herbacées introduites a été évaluée en tenant compte de leur statut de conservation dans leur milieu d'origine. Ce sont les espèces endémiques à leurs zones d'origine et les espèces présentes sur la liste des espèces rares et menacées selon [46]. L'origine des plantes herbacées introduites a été analysée à travers un spectre et un histogramme à partir des continents d'origine de chaque espèce.

3 RÉSULTATS

3.1 RICHESSE ET COMPOSITION FLORISTIQUES

La flore ivoirienne est riche de 1003 espèces introduites appartenant à 609 genres et réparties en 154 familles. La flore herbacée introduite est constituée de 550 plantes appartenant à 345 genres et réparties en 101 familles. Les genres dominants sont: *Heliconia* et *Solanum* (14 espèces chacune), *Crotalaria* (9 espèces) et *Euphorbia* (7 espèces). Les familles les plus prépondérantes (Figure 2) sont: les Fabaceae (59 espèces soit 11%), les Poaceae et les Compositae (44 espèces chacune soit 8%), les Solanaceae (28 espèces soit 5%) et les Araceae (24 espèces soit 4%).

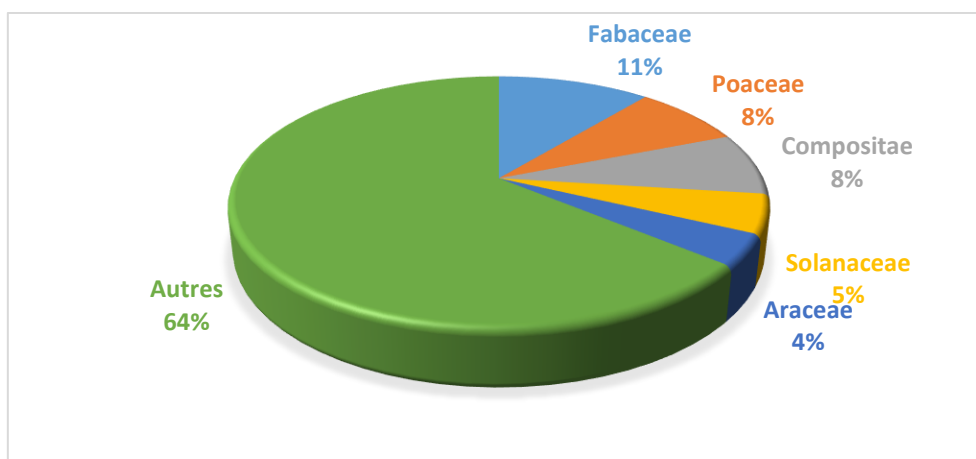


Fig. 2. Spectre des familles botaniques dominantes des plantes herbacées introduites de Côte d'Ivoire

3.2 TYPE BIOLOGIQUE, SOUS-EMBRANCHEMENT, TYPE DE COTYLEDONE, MILIEU DE VIE, LONGEVITE ET TYPE MORPHOLOGIQUE

Au titre des types biologiques, les nanophanérophytes sont majoritaires avec 242 espèces soit 44%. Ils sont suivis des Thérophytes avec 75 espèces soit 14%, des microphanérophytes avec 63 espèces soit 12%, des Chaméphytes avec 60 espèces soit 11%, les Hémicryptophytes avec 45 espèces soit 8%, les Géophytes avec 30 espèces soit 5%. Les autres types biologiques ne sont représentés que par 35 espèces soit 6%. Ce sont les Hydrophytes avec 17 espèces, les Epiphytes avec 15 espèces et les rhéophytes avec 03 espèces (Figure 3). Concernant les sous embranchements, 95% des plantes herbacées introduites sont des Angiospermes contre 5% qui sont des Ptéridophytes (Figure 4). S'agissant du type de cotylédone, la plupart (64%) des plantes herbacées introduites sont des dicotylédones, 31% sont des monocotylédones et 5% sont des Ptéridophytes (fougères). Concernant le milieu de vie, la majorité (93%) des plantes herbacées introduites sont des plantes terrestres, 4% sont des plantes aquatiques, 2% sont épiphytes et 1% sont semi-aquatiques. Au titre de la longévité, 369 plantes herbacées introduites sont vivaces soit 67%, 172 plantes soit 31% sont annuelles et seulement 09 plantes soit 2% sont annuelles/Vivaces. S'agissant des types morphologiques, les plantes herbacées introduites sont subdivisées en 477 plantes dressées soit 87% et 73 lianes soit 13%.

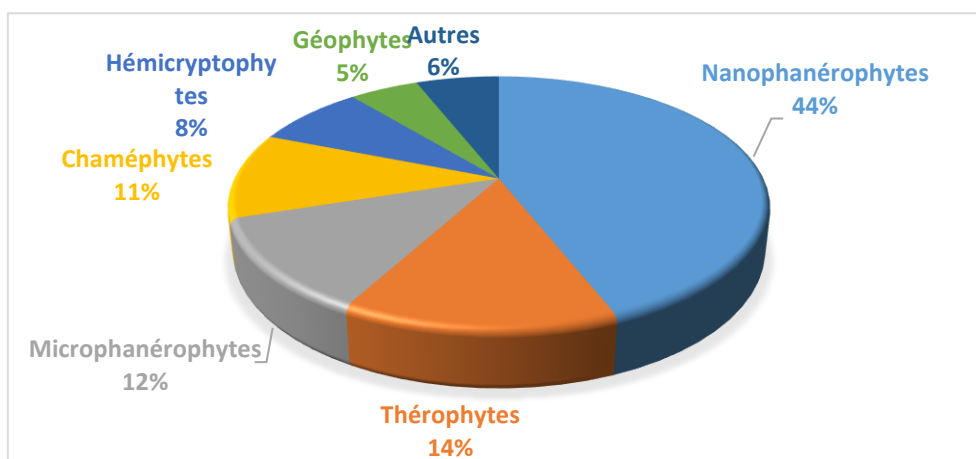


Fig. 3. Spectre des types biologiques des plantes herbacées introduites de Côte d'Ivoire

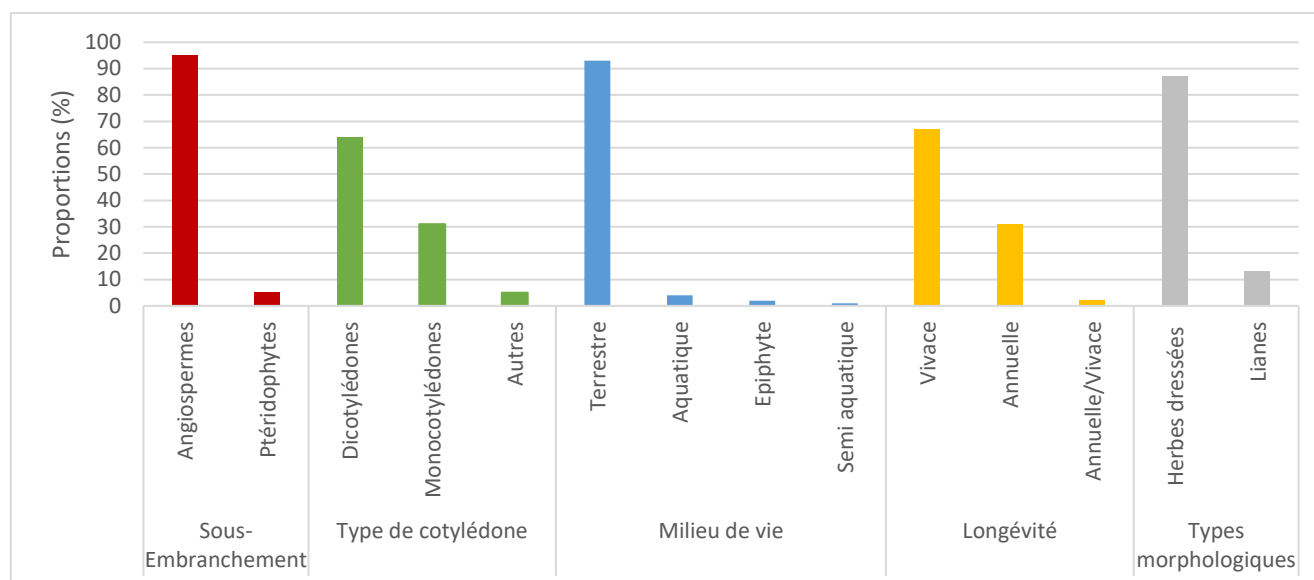


Fig. 4. Sous-Embranchement, type de cotylédone, milieu de vie, longévité et type morphologique des plantes herbacées introduites de Côte d'Ivoire

3.3 STATUT DE CONSERVATION

Il a été recensé 44 espèces à valeur de conservation dans leur zone d'origine (Tableau I) soit 8% de l'ensemble des espèces. Quarante-deux (42) espèces sont endémiques de plusieurs pays dont: le Brésil, l'Inde, le Mexique et les Madagascar. Sept (07) espèces sont présentes sur la liste rouge de [46]. Ce sont: 2 espèces en danger critique d'extinction (CR), *Gaertnera liberiensis* E. M. A. Petit (Rubiaceae) et *Euphorbia prostrata* Aiton (Euphorbiaceae). Trois (03) espèces sont en danger (EN), *Exacum quinquenervium* Griseb. (Gentianaceae), *Plerandra elegantissima* (H.J.Veitch ex Mast.) Lowry, G.M.Plunkett & Frodin (Araliaceae) et *Vanilla planifolia* Jacks. ex Andrews (Orchidaceae). Deux (02) espèces sont vulnérables (VU), *Bulbophyllum bifarium* Hook.f. (Orchidaceae) et *Hohenbergiopsis guatemalensis* (L.B.Sm.) L.B.Sm. & Read (Bromeliaceae).

Tableau 1. Liste des plantes herbacées introduites en Côte d'Ivoire à valeur de conservation dans leur zone d'origine

Taxons	Synonyme	Familles	UICN (2024)	Zones d'endémisme
01. <i>Adiantum confine</i> Fée	-	Pteridaceae	-	Madagascar
02. <i>Agave sisalana</i> Perrine	-	Asparagaceae	-	Mexique
03. <i>Aglaonema crispum</i> (Pitcher & Manda) Nicolson	-	Araceae	-	Philippines
04. <i>Aglaonema robeleynii</i> (Van Geert) Pitcher & Manda	<i>Aglaonema crispata</i> Hook.F.	Araceae	-	Philippines
05. <i>Allium fistulosum</i> L.	-	Amaryllidaceae	-	Chine
06. <i>Allium porrum</i> L.	-	Amaryllidaceae	-	Iran
07. <i>Aloe vera</i> (L.) Burm.f.	-	Asphodelaceae	-	Oman
08. <i>Arachis hypogaea</i> L.	-	Fabaceae	-	Bolivie
09. <i>Aulea amicorum</i> (J. B. Hall) C. Cusset	<i>Saxicolella amicorum</i> J. B. Hall	Podostemaceae	-	Kenya
10. <i>Barleria lupulina</i> Lindl.	-	Acanthaceae	-	Madagascar
11. <i>Brassica napus</i> L.	-	Brassicaceae	-	France
12. <i>Buchnera capitata</i> Benth.	-	Orobanchaceae	-	Afrique du sud
13. <i>Bulbophyllum bifarium</i> Hook.f.	-	Orchidaceae	VU	-
14. <i>Bulbophyllum porphyroglossum</i> Kraenzl.	-	Orchidaceae	-	Bornéo
15. <i>Bulbophyllum tentaculiferum</i> Schltr.	-	Orchidaceae	-	Papouasie Nouvelle Guinée
16. <i>Catharanthus roseus</i> (L.) G.Don	-	Apocynaceae	-	Madagascar
17. <i>Curcuma longa</i> L.	-	Zingiberaceae	-	Inde
18. <i>Dendrocalamus macroculmis</i> (Rivière) J.Houz.	-	Poaceae	-	Vietnam

19. <i>Dypsis lutescens</i> (H.Wendl.) Beentje & J.Dransf.	<i>Chrysalidocarpus lutescens</i> H.Wendl.	Arecaceae	-	Madagascar
20. <i>Elaphoglossum angustatum</i> (Schrad.) Hieron.	-	Dryopteridaceae	-	Afrique du sud
21. <i>Epipremnum aureum</i> (Linden & André) G.S.Bunting	<i>Scindapsus aureus</i> (Linden & André) Engl.	Araceae	-	Îles de la Société
22. <i>Eriosema macrostipulatum</i> Bak.f.	-	Fabaceae	-	Brésil
23. <i>Euphorbia prostrata</i> Aiton	-	Euphorbiaceae	CR	-
24. <i>Exacum quinquenervium</i> Griseb.	-	Gentianaceae	EN	-
25. <i>Gaertnera liberiensis</i> E. M. A. Petit	-	Rubiaceae	CR	Libéria
26. <i>Heliconia rodriguensis</i> Aristeg.	-	Heliconiaceae	-	Venezuela
27. <i>Hippobroma longiflora</i> (L.) G.Don	-	Campanulaceae	-	Jamaïque
28. <i>Hohenbergiopsis guatemalensis</i> (L.B.Sm.) L.B.Sm. & Read	-	Bromeliaceae	VU	-
29. <i>Lactuca sativa</i> L.	-	Compositae	-	Iraq
30. <i>Nicotiana rustica</i> L.	-	Solanaceae	-	Pérou
31. <i>Nicotiana tabacum</i> L.	-	Solanaceae	-	Bolivie
32. <i>Oryza sativa</i> L.	-	Poaceae	-	Chine
33. <i>Peperomia sandersii</i> C. DC.	-	Piperaceae	-	Brésil
34. <i>Philodendron erubescens</i> K.Koch & Augustin	-	Araceae	-	Colombie
35. <i>Plerandra elegantissima</i> (H.J.Veitch ex Mast.) Lowry, G.M.Plunkett & Frodin	<i>Dizygotheca elegantissima</i> Vig. & Guill.	Araliaceae	EN	Nouvelle Calédonie
36. <i>Ptisana fraxinea</i> (Sm.) Murdock	<i>Marattia fraxinea</i> Sm.	Marattiaceae	-	Inde
37. <i>Ruellia congoensis</i> Benoist	-	Acanthaceae	-	République centrafricaine
38. <i>Saccharum officinarum</i> L.	-	Poaceae	-	Papouasie Nouvelle Guinée
39. <i>Sinningia speciosa</i> Benth. & Hook	-	Gesneriaceae	-	Brésil
40. <i>Solanum lycopersicum</i> L.	-	Solanaceae	-	Pérou
41. <i>Spilanthes oleracea</i> Jacq.	-	Asteraceae	-	Brésil
42. <i>Thunbergia atacorensis</i> Akoëgn. & Lisowski	-	Acanthaceae	-	Bénin
43. <i>Uvaria dinklagei</i> Engl. & Diels	-	Annonaceae	-	Libéria
44. <i>Vanilla planifolia</i> Jacks. ex Andrews	-	Orchidaceae	EN	-

Légende: liste Rouge de UICN: VU = vulnérable; EN= En danger; CR: danger critique d'extinction; EW: éteinte à l'état sauvage

3.4 ORIGINE

Les plantes herbacées introduites proviennent en majorité de l'Amérique, précisément de l'Amérique du sud (41%). Elles sont suivies des espèces en provenance de l'Asie avec 23 % et de l'Afrique avec 22%. Les plantes en provenance de l'Asie du sud-est (38%) et du sud (36%) sont majoritaires ainsi que celles en provenance de l'Afrique de l'est (38%) et de l'Afrique centrale (26%). Enfin, viennent les plantes en provenance de l'Océanie avec 9% et de l'Europe avec 5%.

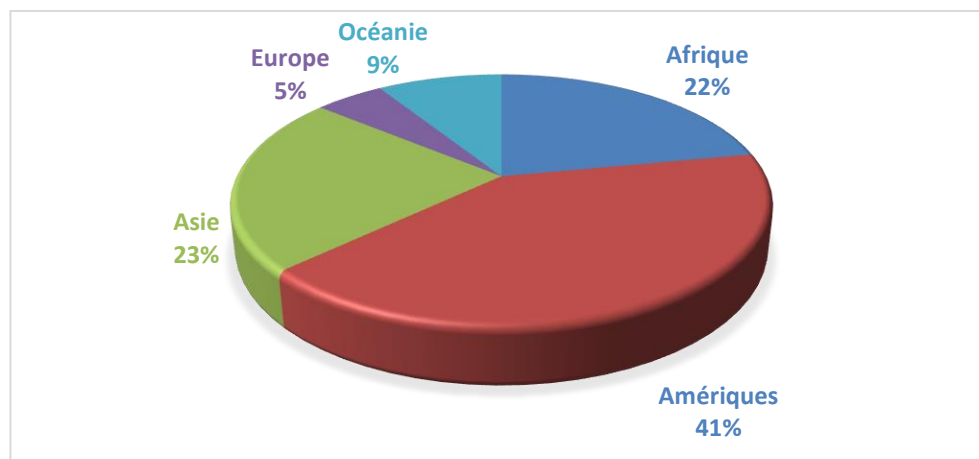


Fig. 5. Spectre des origines des plantes herbacées introduites en Côte d'Ivoire

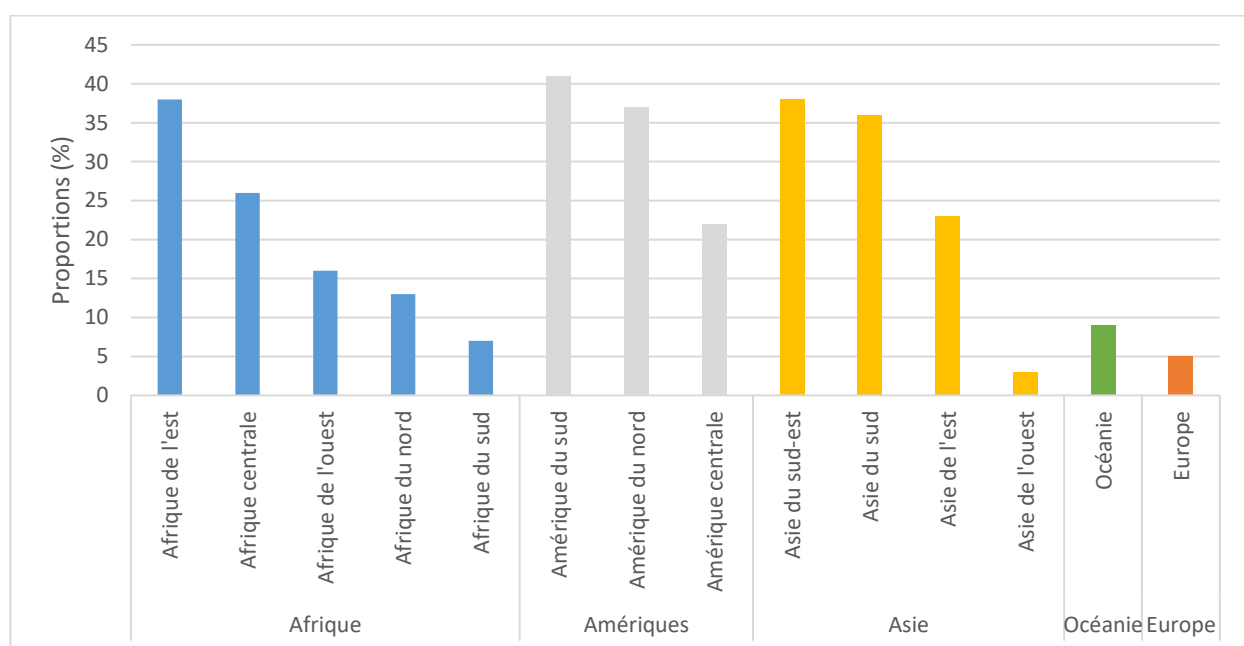


Fig. 6. Histogramme de l'origine des plantes herbacées introduites de Côte d'Ivoire en fonction des continents

4 DISCUSSION

Dans cette étude, 550 plantes herbacées introduites naturalisées appartenant à 345 genres et réparties en 101 familles ont été recensées. Cette valeur représente 55% de la flore introduite ivoirienne qui a été estimée à 1003 espèces [47]. Cette valeur représente également 14% de la flore indigène ou autochtone ivoirienne qui a été estimée à 3882 espèces réparties en 1 218 genres et 192 familles [48]; [28]; [29]. Cette valeur est supérieure à celle des plantes herbacées introduites de la Polynésie française estimée à 319 plantes sur 593 plantes introduites [45]. Cette valeur élevée des herbacées introduites naturalisées pourrait être due à la compétitivité de ces plantes. Ce résultat est similaire à celui de [49] en Chine. Ces auteurs ont également trouvé une prévalence d'herbes et un nombre remarquablement faible de vivaces boisées. En effet, les plantes invasives herbacées ont la capacité de produire de nombreuses graines ce qui renforce leur pouvoir compétitif [50]; [51]. Les plantes herbacées introduites sont des Angiospermes dicotylédones, terrestres. Elles sont la plupart (67%) vivaces. Ces résultats sont similaires à ceux de [45] sur les plantes introduites naturalisées de la Polynésie française. Il a été recensé 44 espèces à statut particulier soit 8% de l'ensemble des espèces. Quarante-deux (42) espèces sont endémiques de plusieurs pays dont: le Brésil, l'Inde, le Mexique et les Madagascar. Sept (07) espèces sont présentes sur la liste rouge de [46]. Ce sont: 2 espèces en danger critique d'extinction (CR), 03 espèces en danger (EN) et (02) espèces vulnérables (VU). Ces espèces à valeur de conservation confirment bien le fait que les introductions d'espèces se font également sur la base de la conservation de la biodiversité mondiale. En outre, la plupart de ces espèces à valeur de conservation sont des plantes alimentaires, médicinales ou ornementales. C'est le cas de *Exacum quinquenervium* Griseb. (Gentianaceae), *Plerandra elegantissima* (H.J.Veitch ex Mast.) Lowry, G.M.Plunkett & Frodin (Araliaceae) qui sont des plantes ornementales. Selon [52], l'horticulture est considérée comme un des principaux vecteurs

d'introductions des plantes invasives. En effet, la plupart des plantes invasives sont des plantes ornementales. Initialement introduites par l'homme pour des usages horticoles dans les jardins botaniques, les pépinières, les parcs, les jardins, elles se sont malheureusement échappées et ont colonisé les milieux naturels. *Vanilla planifolia* Jacks. ex Andrews (Orchidaceae) est une plante alimentaire et *Aloe vera* (L.) Burm.f. (Asphodelaceae) qui est à la fois une plante alimentaire et médicinale [53]. Les plantes herbacées introduites proviennent en majorité (41 %) des Amériques et de l'Asie (23 %). Nos résultats sont similaires à ceux de plusieurs auteurs. [54] ont montré que la plupart des espèces exotiques du Ghana provenaient des Amériques et d'Asie. Selon [45], les espèces naturalisées en Polynésie française sont majoritairement d'origine américaine (39% des espèces) et asiatique (27% des espèces).

5 CONCLUSION

Dans cette étude, 550 plantes herbacées introduites naturalisées appartenant à 345 genres et réparties en 101 familles ont été recensées. Les genres dominants sont: *Heliconia* et *Solanum*, *Crotalaria* et *Euphorbia*. Les familles les plus prépondérantes sont: les Fabaceae, les Poaceae, les Compositae, les Solanaceae et les Araceae. Les plantes herbacées introduites sont dominées par les nanophanérophytes avec 242 espèces soit 44%. Ce sont la plupart des Angiospermes dicotylédones, terrestres. Elles sont majoritairement (67%) vivaces. S'agissant des types morphologiques, les plantes herbacées introduites sont subdivisées en 477 plantes dressées soit 87% et 73 lianes soit 13%. Il a été recensé 44 espèces à valeur de conservation dans leur zone d'origine soit 8% de l'ensemble des espèces. Quarante-deux (42) espèces sont endémiques de plusieurs pays dont: le Brésil, l'Inde, le Mexique et les Madagascar. Sept (07) espèces sont présentes sur la liste rouge de [46]. Ce sont: 2 espèces en danger critique d'extinction (CR), 03 espèces en danger (EN) et (02) espèces vulnérables (VU). Les plantes herbacées introduites proviennent en majorité des Amériques (41 %) et de l'Asie (23 %).

REFERENCES

- [1] S. Monnier, M. Thibaudon, J.P. Besancenot, C. Sindt and G. Oliver, 2021. Reconnaître les herbacées. *Revue Française d'Allergologie*, 61 (4): 247, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.j.reval.2021.03.047>
- [2] L. Allorge, La Fabuleuse odyssée des plantes: les botanistes voyageurs, les Jardins des Plantes, les Herbiers. Paris, JC Lattès, 727 pages, 2003.
- [3] D.M. Richardson, P. Pyšek, M. Rejmánek, M.G. Barbour, F.D. Panetta and C.J. West, Naturalization and invasion of alien plants: Concepts and definitions« Biodiversity and Distributions, Vol.6, pp.93-107, 2000.
- [4] I. Kowarik, «Human agency in biological invasion: secondary releases foster naturalisation and population expansion of alien plant species» *Biological Invasion*, 5: 293-312, 2003.
- [5] T.M. Blackburn, P. Pyšek, S. Bacher, J.T. Carlton, R.P. Duncan, V. Jarošík, J.R.U. Wilson and D.M. Richardson, A proposed unified framework for biological invasions. *Trends in Ecology & Evolution*, 26: 333-339, 2011.
- [6] D. Pimentel, S. McNair, J. Janecka, J. Wightman, C. Simmonds, C. O'Connell, E. Wong, L. Russel, J. Zern, T. Aquino and T. Tsomondo, Economic and environmental threats of alien plant, animal, and microbe invasions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 84: 1-20, 2001.
- [7] L.J. Olson, The economics of terrestrial invasive species: a review of the literature. *Agricultural and Resource Economics Review*, 35: 178-194, 2006.
- [8] M. Vilà and P.E. Hulme, Non-native species, ecosystem services, and human well-being. In: Vila` M, Hulme PE (eds) Impact of biological invasions on ecosystem services. *Springer, Cham*, pp 1-14, 2017.
- [9] H. De Foresta, *Chromolaena odorata* and disturbance of natural succession after shifting cultivation: an example from Mayombe, Congo, Central Africa. In: R. Munniappan and P. Ferrar (Eds.). *Ecology and Management of Chromolaena odorata*. Biotrop (Bogor) Special Publication, 44: 23-41, 1991.
- [10] D.F.R. Neuba, D.F. Malan, M. Koné and Y.L. Kouadio, 2014. Inventaire préliminaire des plantes envahissantes de la Côte d'Ivoire. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 22 (2): 3439-3445, 2014.
- [11] K.H. Kouassi, K. N'Guessan, G.M. Gnahoua and D. Traore, Dynamique de *Chromolaena odorata* (L.) R. M. king & H. Rob. et évolution de la richesse floristique au cours de la reconstitution de la flore postculturale en zone de forêt semi-décidue de Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine*, 20 (3): 257-265, 2008.
- [12] M.S. Tiébré and Z.R. Gouli Gnanazan, Impact of *Chromolaena odorata* (L.) R.M. King & H. Rob. (Asteraceae) on the floristic composition and the physico-chemical properties of the soil of a coastal relict forest. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 24 (2): 773-788, 2018.
- [13] RGPH, Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH). Institut National de Statistique (INS), Rapport d'exécution et présentation des principaux résultats, Côte d'Ivoire, 49 p, 2014.
- [14] A. Perraud, Les sols. In: Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM, Paris (France), pp 157-263, 1971.
- [15] F.A.O., World reference base for soil resources. A framework for international classification, correlation and communication. World soil resources reports 103, 145 p, 2006.
- [16] M. Eldin, Le climat de la Côte d'Ivoire. In: Le milieu naturel de Côte d'Ivoire. Mémoires ORSTOM, 50, Paris (France), pp 73-108, 1971.
- [17] F.L.J.B. Avit, L.P. Pedia and Y. Sankaré, Diversité Biologique de la Côte d'Ivoire. Rapport de synthèse, Ministère de l'Environnement et de la Forêt, 273 p, 1999.

- [18] M.C. Peel, B.L. Finlayson and T.A. McMahon, Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11 (5): 1633-1644, 2007.
- [19] J.L. Guillaumet and E. Adjanooun, La végétation de la Côte d'Ivoire. In: *Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire*, ORSTOM, 50, Paris (France), pp. 157-263, 1971.
- [20] J. Falk-Petersen, T. Bøhn and OT. Sandlund, On the numerous concepts in invasion biology. *Biological invasions*. 8: 1409-1424, 2006.
- [21] N. Pieret, E. Delbart, S. Vanderhoeven and G. Mahy, Méthodes de gestion des principales plantes invasives en zones humides. *Gestion forestière*, 18-22, 2008.
- [22] YJC. Kouadio, Diversité végétale, services écosystémiques et valeur économique de la végétation urbaine: cas des communes de Cocody et Plateau du district d'Abidjan (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Cocody (Abidjan), Université Félix Houphouët-Boigny, 186p, 2016.
- [23] A.E. N'Guessan, Dynamique de la végétation et facteurs de reconstitution de la biomasse des forêts secondaires dans la forêt classée d'Agbo 1 (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Cocody (Abidjan), Université Félix Houphouët-Boigny, 176p, 2018.
- [24] A.F.E. Kouamé, Diversité, pratiques culturelles et valeur économique des plantes ornementales produites dans la sous-préfecture d'azaguié (sud-est, Côte d'Ivoire). Mémoire de Master, Cocody (Abidjan), Université Félix Houphouët-Boigny, 69p, 2020.
- [25] G.J.R. Nomel, Diversité végétale, services écosystémiques des espaces verts urbains et état de santé des espèces arborescentes de la ville de Yamoussoukro (centre, Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Cocody (Abidjan), Université Félix Houphouët-Boigny, 237p, 2020.
- [26] W.M. Egnankou, Flore et végétation des zones humides du sud-est de la cote d'ivoire: problèmes de pollution et méthodes de lutte contre les Végétaux Aquatiques Envahissants (VAE). Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire, 235 p, 2015.
- [27] L. Gautier, L. Aké Assi, C. Chatelain and R. Spichiger, African Plants: Biodiversity Taxonomy and uses, chapter Ivoire: a geographic information system for biodiversity management in Ivory Coast. *Royal Botanic Garden*, 183-194, 1999.
- [28] L. Aké-Assi, Flore de la Côte d'Ivoire 1, Catalogue systématique, biogéographie et écologie. Conservatoire et Jardin Botaniques: Genève (Suisse), 2001.
- [29] L. Aké-Assi, Flore de la Côte d'Ivoire 2, catalogue, systématique, biogéographie et écologie. Conservatoire et Jardin Botaniques: Genève (Suisse), 2002.
- [30] D.F.R. Neuba, D.F. Malan, M. Koné and Y.L. Kouadio, Inventaire préliminaire des plantes envahissantes de la Côte d'Ivoire. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 22 (2): 3439-3445, 2014.
- [31] K. Noba, C. Bassene, A. Ngom, M. Gueye, A.A. Camara, M. Kane, F. Ndoeye, B. Dieng, R. Rmballo, N. Ba, M.Y. Bodian, S. Sane, D. Diop, M. Gueye, I.S. Konta, A. Kane, M.S. Mbaye and A.T. Ba, Invasive Plants of West Africa: Concepts, Overviews and Sustainable Management. *Advances in Recycling & Waste Management*, 2: 121, 2017.
- [32] L.M.D. Adou, B.B.H.J. Gonezietti and G.N. Zirihi, Enquête Ethnobotanique et Utilisations des Ptéridophytes du Parc National du Banco, District d'Abidjan (Côte d'Ivoire). *Journal of Animal & Plant Sciences*, 38 (2): 6206-6216, 2018.
- [33] M. Dogba, D.F. Malan, D.F.R. Neuba and A.S. Konan, Biologie et écologie de *Porophyllum ruderale* (Jacq.) Cass., une Compositae nouvellement apparue en Côte d'Ivoire. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 36 (3): 5907-5918, 2018.
- [34] A.F. Kouassi, A.E. Aké-Assi, K. Yao and B. N'Goran, Liste de quelques espèces envahissantes de l'herbier du Centre National de Floristique (CNF) en Côte d'Ivoire. Version 1.2. INSTITUT BOTANIQUE AKE-ASSI D'ANDOKOI (IBAAN). Occurrence dataset <https://doi.org/10.15468/0aoqi5> accessed via GBIF.org on 2020-05-15. 2018.
- [35] S.E.V. Akaffou, O. Mévanly, Z.R. Gouli Gnanazan and M.S. Tiébré, Dynamique de Colonisation des Zones Rudérales d'un Massif Forestier Urbain par les Espèces Végétales Exotiques Envahissantes: Cas du Parc National du Banco (Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, 15 (21): 240-267, 2019.
- [36] E.E. Asseh, Y. Konan and E. Aké-Assi, Diversité et Connaissance Ethnobotanique des Espèces de la Famille des Acanthaceae de la Réserve Naturelle Partielle de Dahliafleur, Côte d'Ivoire. *European Scientific Journal*, 15 (9): 444-459, 2019.
- [37] V. Van der Meersch, I.C. Zo-Bi, H.K.B. Amani, N.J. Kassi, A.E. N'Guessan and B. Herault, Causes and consequences of *Cedrela odorata* invasion in West African semi-deciduous tropical forests. *Biological Invasions*, 23: 537-552, 2021.
- [38] M.S. Tiébré, S.E.V. Akaffou and F.P.J. Pagny, Invasive alien plants of Côte d'Ivoire: an update and proposed classification based on environmental impacts. *Int. J. Adv. Res.*, 12 (04): 780-793, 2024.
- [39] H. De Foresta, Systèmes de culture adventices envahissantes et fertilité du milieu: le cas de *Chromolaena odorata*. In: Pichot J, Sibelet N, Lacoévilhe JJ. (eds) Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides. CIRAD: Ministère de la Coopération, Montpellier (FRA), 1995.
- [40] UICN/ PACO, Plantes invasives affectant les aires protégées de l'Afrique de l'Ouest: gestion pour la réduction des risques pour la biodiversité. UICN/PACO: Ouagadougou, Burkina-Fasso, 2013.
- [41] C. Raunkiaer, The life forms of plants and statistical plant geography. Oxford University Press: London (Angleterre), 1934.
- [42] M. Arbonnier, Arbres, arbustes et lianes des zones sèches de l'Afrique de l'Ouest. Édition CIRAD-MNHN, Paris (France), 573 p, 2002.
- [43] J.P. Lebrun and A.L. Stork, Enumération des plantes à Fleurs d'Afrique Tropicale. Conservatoire et Jardin Botaniques de la Ville de Genève: Genève (Suisse), Vol. 1 (249 pp.), vol. 2 (257 pp.), vol. 3 (341 pp.) et vol. 4 (711 pp.); 1991-1997.
- [44] APG IV, An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161: 1-20, 2016.

- [45] M. Fourdrigniez and J.Y. Meyer, Liste et caractéristiques des plantes introduites naturalisées et envahissantes en Polynésie française. Contribution à la Biodiversité de Polynésie française N°17: Délégation à la Recherche, Papeete, 2008.
- [46] UICN, IUCN (International Union for the Conservation of the Nature). IUCN Red List of Threatened Species. Version 2024.2. [Online] Available: www.iucnredlist.org. (Consultée le 14/09/2024).
- [47] Z.R. Gouli Gnanazan, A.E. N'Guessan and N.O. Yao, 2025. The introduced and naturalized flora of Côte d'Ivoire: Diversity, origins, and introduction history. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 1-23, 2025. *In Press*.
- [48] L. Aké-Assi, Flore de la Côte d'Ivoire: Etude descriptive et biogéographique avec quelques notes ethnobotaniques. Thèse de Doctorat d'Etat, Faculté des Sciences et Techniques, Université de Cocody, Abidjan (Côte d'Ivoire), 1206 p, 1984.
- [49] E. Weber, S.G. Sun and B. Li, Invasive alien plants in China: diversity and ecological insights. *Biological Invasions*, 10: 1411-1429, 2008.
- [50] K. Jelbert, I. Stott, R.A. McDonald and D. Hodgson, Invasiveness of plants is predicted by size and fecundity in the native range. *Ecology and Evolution* 5 (10): 1933-1943, 2015. <https://doi.org/10.1002/ece3.1432>.
- [51] L. Moravcová, P. Pyšek, V. Jarošík and J. Pergl, Getting the Right Traits: Reproductive and Dispersal Characteristics Predict the Invasiveness of Herbaceous Plant Species (ed B Li). *PLOS ONE*, 10: 1-16, 2015.
- [52] M. Halford and G. Mahy, AlterIAS (ALTERnatives to Invasive Alien Species). Unité Biodiversité & Paysage de l'Université de Liège Gembloux Agro-Bio Tech, 10 p, 2013.
- [53] A. Ziani and A. Boualleg, Etude de l'activité antioxydante d'une plante médicinale « *Aloe Vera* ». 3-Faculté des Science Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie, 119 p, 2019.
- [54] M. Ansong, J. Pergl, Essl F et al., Naturalized and invasive alien flora of Ghana. *Biol Invasions*, 21: 669-683, 2019.

L'investissement direct étranger en Amérique du nord

[Foreign Direct Investment in North America]

Ngoy Kabila Elisée, Kazembe Ngalula Sebastien, Mbunsu Bindu Etienne, and Muteba A. Yumba Eustache

Université de Malemba-Nkulu, RD Congo

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

ABSTRACT: FDI in North America has been a driver of economic growth and development, but it has also raised significant challenges. To maximize the benefits of FDI and minimize its drawbacks, governments must implement appropriate policies, such as tax incentives to attract investments, strict environmental regulations, and measures to protect domestic businesses.

KEYWORDS: exports, international trade, global economy, Foreign Direct Investment (FDI), North America, Canada, United States, Mexico.

RESUME: L'IDE en Amérique du Nord a été un moteur de croissance économique et de développement, mais il a également soulevé des défis importants. Pour maximiser les avantages de l'IDE et minimiser ses inconvénients, les gouvernements doivent mettre en place des politiques appropriées, telles que des incitations fiscales pour attirer les investissements, des réglementations environnementales strictes et des mesures de protection des entreprises nationales.

MOTS-CLEFS: exportations, commerce international, économie mondiale, Investissement direct étranger (IDE), Amérique du Nord, Canada, États-Unis, Mexique.

1 INTRODUCTION

L'investissement direct étranger (IDE) en Amérique du Nord constitue un phénomène économique majeur, façonnant les économies du Canada, des États-Unis et du Mexique. Au-delà de simples flux de capitaux, l'IDE représente un transfert de technologies, de savoir-faire et de compétences, ainsi qu'une intégration profonde des économies !

Les flux commerciaux intra régionaux et l'IDE ont transformé l'économie nord-américaine, en créant un espace économique intégré et dynamique. Cependant, cette intégration a également soulevé des défis, tels que la vulnérabilité aux chocs économiques mondiaux et les inégalités sociales.¹

L'investissement direct étranger (IDE) a joué un rôle déterminant dans l'intensification des échanges commerciaux en Amérique du Nord. Les entreprises multinationales ont massivement investi dans la région, créant ainsi des filiales et des usines de production.

¹ OLIVIER DABENE : « L'intégration régionale dans les Amériques, Economie po de la convergence ». sur [http : sciences po.fr/ceri/sites/ sciens po.fr.ceri/files/étude 45](http://sciences.po.fr/ceri/sites/sciens-po.fr.ceri/files/étude_45) ».

2 PROLEGOMENE CONCEPTUEL

L'Amérique du Nord, avec ses trois grands pays que sont les États-Unis, le Canada et le Mexique, forme un bloc économique particulièrement intégré. Cette intégration se manifeste notamment par d'importants **flux commerciaux intra-régionaux** et des **investissements directs étrangers (IDE)** considérables.

Les flux commerciaux intra-régionaux: un moteur de croissance

Les échanges commerciaux entre les pays d'Amérique du Nord ont connu une croissance exponentielle ces dernières décennies, favorisée par:

- **Les accords de libre-échange:** L'Accord de libre-échange nordaméricain (ALENA), remplacé par l'Accord États-Unis-Mexique-Canada (USMCA), a supprimé la plupart des droits de douane et des barrières non tarifaires, stimulant ainsi les échanges.
- **La complémentarité économique:** Chaque pays dispose de ressources et d'industries spécifiques, ce qui crée des opportunités de commerce mutuellement avantageuses. Les États-Unis sont un important marché de consommation, le Canada est riche en ressources naturelles et le Mexique dispose d'une main-d'œuvre qualifiée à moindre coût.
- **Les chaînes de valeur mondiales:** L'intégration des économies nordaméricaines dans les chaînes de valeur mondiales a renforcé les liens commerciaux entre les trois pays.

Les principaux produits échangés sont les produits manufacturés, les matières premières, les produits agricoles et les biens de consommation.²

Les investissements directs étrangers: un vecteur de développement

Les IDE jouent un rôle essentiel dans l'intégration économique de l'Amérique du Nord. Ils permettent:

- **La création d'emplois:** Les entreprises étrangères investissant dans un pays créent de nouveaux emplois et transfèrent des technologies.
- **Le développement des infrastructures:** Les IDE contribuent à moderniser les infrastructures de transport, d'énergie et de communication.
- **La diversification économique:** Ils permettent aux économies de se diversifier et de réduire leur dépendance envers un petit nombre de secteurs.

Les principaux secteurs d'investissement sont l'automobile, l'électronique, les produits chimiques et les services.³

2.1 FLUX COMMERCIAUX INTRA-RÉGIONAUX

- **Interdépendance stratégique:** Le commerce intra-régional est perçu comme un outil de puissance. Un État peut utiliser sa position économique dominante pour influencer les politiques d'autres États ou pour garantir son approvisionnement en ressources essentielles.
- **Sécurité économique:** Les échanges commerciaux permettent de diversifier les économies et de réduire la vulnérabilité aux chocs externes, renforçant ainsi la sécurité nationale.
- **Compétition hégémonique:** Les accords commerciaux comme l'USMCA peuvent être interprétés comme des instruments pour consolider l'hégémonie économique d'un État (les États-Unis) au sein de la région.

2.1.1 INVESTISSEMENT DIRECT ÉTRANGER (IDE)

- **Outil d'expansion économique et politique:** Les IDE sont vus comme un moyen d'étendre son influence économique et politique sur d'autres territoires. Ils permettent de contrôler des ressources stratégiques, d'influencer les politiques locales et de renforcer sa position dans la compétition globale.
- **Sécurité nationale:** Les IDE peuvent être utilisés pour sécuriser des chaînes d'approvisionnement essentielles ou pour contrôler des infrastructures critiques.
- **Instrument de soft power:** Les IDE peuvent être utilisés pour promouvoir les valeurs et les normes d'un État, tout en renforçant ses relations économiques avec d'autres pays.

² Alfredo Valladao, le retour du panaméricanisme. La stratégie des États-Unis en Amérique latine après la guerre froide, Paris, les cahiers du CREST, 1995.

³ Deblock, C. et Bunelle, D. une intégration stratégique : le cas nord-américain. Etudes internationales, <https://doi.org/10.7202/703211ar>.

2.1.2 CAS SPECIFIQUE DE L'AMERIQUE DU NORD

- **Intégration économique:** Le NAFTA/USMCA est souvent interprété à travers le prisme réaliste comme un outil pour les États-Unis d'étendre leur influence économique et politique en Amérique du Nord, tout en renforçant leur sécurité économique.
- **Déséquilibres commerciaux:** Les déséquilibres commerciaux entre les États-Unis et ses partenaires nord-américains peuvent être expliqués par la recherche de puissance et d'influence des États-Unis.
- **Compétition entre les États:** Les États-Unis, le Canada et le Mexique sont en compétition constante pour attirer les investissements et les marchés, reflétant une dynamique de puissance caractéristique du réalisme.

3 CADRE THEORIQUE ET METHODOLOGIQUES

La théorie réaliste offre un cadre utile pour analyser les flux commerciaux intra-régionaux et les IDE en Amérique du Nord. Elle permet de comprendre comment les États utilisent ces outils pour maximiser leur puissance et leur sécurité. Cependant, il est important de la combiner avec d'autres approches théoriques pour obtenir une vision plus complète et nuancée des phénomènes étudiés.⁴

Pour obtenir une vision plus complète des IDE, il est souvent utile de combiner des méthodes quantitatives et qualitatives. Par exemple, on peut utiliser des données statistiques pour identifier les tendances générales, puis réaliser des études de cas pour approfondir la compréhension de certains phénomènes.

La théorie réaliste en relations internationales postule que les États sont les acteurs principaux sur la scène mondiale, motivés par la quête de puissance et de sécurité. Ils agissent de manière rationnelle pour maximiser leurs intérêts nationaux dans un environnement anarchique, où il n'existe pas d'autorité supérieure pour réguler leurs comportements.

- **Banque mondiale:** Les rapports de la Banque mondiale sur l'économie de l'Amérique du Nord fournissent des analyses détaillées des tendances économiques et des politiques publiques.
- **Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE):** L'OCDE publie régulièrement des études sur les échanges commerciaux et les investissements directs étrangers en Amérique du Nord.
- **Commission économique pour l'Amérique latine et les Caraïbes (CEPAL):** La CEPAL propose des analyses sur l'intégration économique régionale en Amérique latine et dans les Caraïbes, y compris l'Amérique du Nord.

4 RÉSULTAT & DISCUSSIONS

4.1 LES PRINCIPAUX PAYS EXPORTATEURS EN AMERIQUE DU NORD

L'Amérique du Nord est une région économique très intégrée, où les échanges commerciaux sont particulièrement dynamiques entre ses trois principaux pays: les **États-Unis**, le **Canada** et le **Mexique**.

4.2 LES ÉTATS-UNIS: UN GEANT DE L'EXPORTATION MONDIALE

Les **États-Unis** sont de loin le plus grand exportateur d'Amérique du Nord, et l'un des plus importants au monde. Leurs exportations couvrent un large éventail de produits, notamment:

- **Les produits manufacturés:** machines, équipements électriques, véhicules automobiles, produits chimiques, etc.
- **Les produits agricoles:** céréales, viande, produits laitiers.
- **Les services:** technologies de l'information, finance, etc.

La position dominante des États-Unis dans le commerce mondial s'explique par plusieurs facteurs:

☐ Une économie diversifiée et très productive

- **Un vaste marché intérieur** qui favorise les économies d'échelle
- **Une monnaie forte** qui renforce le pouvoir d'achat des exportations américaines

☐ Une position géographique stratégique au cœur du continent américain

⁴ ADRIENNE WARREN, les relations économiques trilatérales en Amérique du nord, Atelier ALENA. 20 mars 2003.

4.3 LE CANADA: UN EXPORTATEUR DE RESSOURCES NATURELLES ET DE PRODUITS MANUFACTURES

Le **Canada** est un autre grand exportateur en Amérique du Nord. Ses principales exportations sont:

- **Les ressources naturelles:** pétrole, gaz naturel, bois, minéraux.
- **Les produits manufacturés:** véhicules automobiles, produits chimiques, équipements électriques.

La proximité géographique avec les États-Unis et les accords de libre-échange ont fortement influencé le commerce extérieur canadien.

4.4 LE MEXIQUE: UN EXPORTATEUR DE PRODUITS MANUFACTURES ET DE PRODUITS AGRICOLES

Le **Mexique** a connu une croissance rapide de ses exportations ces dernières décennies, grâce à l'implantation de nombreuses entreprises étrangères et à l'intégration dans les chaînes de valeur mondiales. Les principales exportations mexicaines sont:

- **Les produits manufacturés:** véhicules automobiles, équipements électriques, produits électroniques.
- **Les produits agricoles:** légumes, fruits, bière.

L'accord de libre-échange nord-américain (USMCA) a renforcé les liens commerciaux entre le Mexique et ses voisins du Nord.

5 LES FACTEURS INFLUENÇANT LES EXPORTATIONS EN AMERIQUE DU NORD

Plusieurs facteurs influencent les exportations en Amérique du Nord:

- **Les accords de libre-échange:** L'USMCA a considérablement facilité les échanges entre les trois pays.
- **Le taux de change:** Les fluctuations des taux de change peuvent affecter la compétitivité des exportations.
- **La demande mondiale:** La croissance économique mondiale et les changements dans les préférences des consommateurs influencent les exportations.
- **Les politiques gouvernementales:** Les politiques commerciales et industrielles des gouvernements peuvent favoriser ou freiner les exportations.

6 LES CONSÉQUENCES DE L'INVESTISSEMENT DIRECT ÉTRANGER (IDE) EN AMERIQUE DU NORD

L'investissement direct étranger (IDE) en Amérique du Nord a eu un impact profond et multiforme sur les économies du Canada, des États-Unis et du Mexique. Cet afflux de capitaux étrangers a engendré une série de conséquences, tant positives que négatives, qui ont façonné le paysage économique et social de la région.⁵

6.1 CONSÉQUENCES POSITIVES

Absolument ! Les investissements directs étrangers (IDE) en Amérique du Nord ont eu un impact considérable sur le développement économique de la région. Voici quelques-unes des conséquences positives les plus notables:

Croissance économique:

- **Création d'emplois:** Les IDE génèrent de nouveaux emplois, tant dans les entreprises étrangères qui investissent que dans les entreprises locales qui leur fournissent des biens et des services.
- **Transfert de technologies:** Les entreprises étrangères apportent souvent avec elles des technologies de pointe, ce qui stimule l'innovation et la productivité dans les économies d'accueil.
- **Accroissement des exportations:** Les IDE peuvent favoriser les exportations en permettant aux entreprises d'accéder à de nouveaux marchés et de bénéficier de réseaux de distribution internationaux.

6.2 DÉVELOPPEMENT DES INFRASTRUCTURES:

- **Amélioration des infrastructures:** Les entreprises étrangères investissent souvent dans l'amélioration des infrastructures locales, telles que les routes, les ports et les réseaux de communication, ce qui bénéficie à l'ensemble de l'économie.⁶

⁵ Deblock, C., « Le libre-échange nord-américain : le joker des États-Unis : [https : Il gam. Ca » pdf » libre-échange nord-amer.](https://ilgam.ca/pdf/libre-échange_nord-amer.pdf)

⁶ Institut Jacques Delors, « L'intégration régionale en Amérique du sud », [https : Il institut selors. Eu » etud 54fr-ameriquelatine.](https://il.institut-selors.eu/etud/54fr-ameriquelatine)

6.3 INTÉGRATION DANS L'ÉCONOMIE MONDIALE:

- **Intensification des échanges commerciaux:** Les IDE renforcent les liens commerciaux entre les pays d'Amérique du Nord et le reste du monde, ce qui favorise une plus grande intégration dans l'économie mondiale.

6.4 AMÉLIORATION DES COMPÉTENCES:

- **Transfert de savoir-faire:** Les employés locaux ont l'opportunité d'acquérir de nouvelles compétences et de meilleures pratiques grâce à leur collaboration avec des employés étrangers.

6.5 DIVERSIFICATION ÉCONOMIQUE:

- **Réduction de la dépendance à certains secteurs:** Les IDE peuvent contribuer à diversifier les économies en créant de nouvelles industries et en réduisant la dépendance à certains secteurs traditionnels.

6.6 AUGMENTATION DES RECETTES FISCALES:

- **Revenus pour les gouvernements:** Les IDE génèrent des recettes fiscales supplémentaires pour les gouvernements, qui peuvent être utilisées pour financer des projets d'infrastructure et des services publics.
- **Croissance économique:** L'IDE a stimulé la croissance économique en créant de nouveaux emplois, en transférant des technologies de pointe et en augmentant la productivité.
- **Création d'emplois:** Les entreprises étrangères ont investi dans de nouveaux projets, ce qui a entraîné la création de nombreux emplois, tant dans les secteurs manufacturiers que dans les services.
- **Transfert de technologie:** Les entreprises étrangères ont apporté avec elles des technologies de pointe, ce qui a permis aux entreprises locales d'améliorer leurs processus de production et de développer de nouveaux produits.
- **Intégration économique:** L'IDE a favorisé l'intégration économique de l'Amérique du Nord grâce à la création de chaînes de valeur transfrontalières.
- **Augmentation des exportations:** Les entreprises étrangères ont souvent utilisé les pays d'accueil comme plateformes d'exportation, ce qui a contribué à augmenter les exportations de ces pays.
- **Amélioration des infrastructures:** Les investissements étrangers ont souvent été accompagnés de la construction de nouvelles infrastructures, telles que des usines, des bureaux et des réseaux de transport, ce qui a amélioré la qualité de vie des populations locales.

6.7 CONSÉQUENCES NÉGATIVES

- **Perte d'autonomie économique:** Une trop grande dépendance à l'égard de l'IDE peut réduire l'autonomie économique d'un pays et le rendre vulnérable aux fluctuations de l'économie mondiale.
- **Concentration des richesses:** L'IDE peut entraîner une concentration des richesses entre les mains d'un petit nombre d'entreprises, ce qui peut accentuer les inégalités sociales.
- **Exploitation des ressources naturelles:** Les entreprises étrangères peuvent être tentées d'exploiter les ressources naturelles des pays d'accueil de manière non durable.
- **Impact environnemental:** L'activité économique accrue liée à l'IDE peut avoir des conséquences négatives sur l'environnement, telles que la pollution et la dégradation des écosystèmes.
- **Perte de contrôle sur les entreprises nationales:** L'acquisition d'entreprises nationales par des entreprises étrangères peut entraîner une perte de contrôle sur des secteurs clés de l'économie.⁷

7 LES DÉFIS ET PERSPECTIVES

Malgré les nombreux avantages de cette intégration économique, l'Amérique du Nord fait face à plusieurs défis:

- **Les déséquilibres commerciaux:** Les États-Unis enregistrent un important déficit commercial avec le Mexique et le Canada, ce qui suscite des tensions protectionnistes.
- **La concurrence internationale:** L'Amérique du Nord doit faire face à la concurrence d'autres régions du monde, notamment l'Asie.

⁷ Pierre Monbeig ; les investissements Nord-Américains et l'évolution économique de l'Amérique annales de géographie/Année 1955/342/pp. 106-119.

- **Les enjeux environnementaux et sociaux:** L'intégration économique doit se faire en tenant compte des enjeux environnementaux et sociaux, tels que le changement climatique et les inégalités.

Les perspectives pour les flux commerciaux intra-régionaux et les IDE en Amérique du Nord restent positives à moyen terme. La poursuite de la mise en œuvre de l'USMCA, la digitalisation des échanges et la transition énergétique devraient soutenir cette dynamique.

8 CONCLUSION

L'Amérique du Nord est une région économique dynamique où les échanges commerciaux jouent un rôle central. Les États-Unis, le Canada et le Mexique sont les principaux acteurs de ces échanges, chacun ayant ses propres spécialités et avantages comparatifs. Les accords de libre-échange, la mondialisation et les progrès technologiques continuent de transformer les échanges commerciaux en Amérique du Nord.

Les flux commerciaux intra-régionaux et les investissements directs étrangers constituent les piliers de l'intégration économique de l'Amérique du Nord. Cette intégration offre de nombreuses opportunités de croissance et de développement, mais elle nécessite également une adaptation constante aux nouveaux défis mondiaux.

REFERENCES

- [1] OLIVIER DABENE: « L'intégration régionale dans les Amériques, Economie po de la convergence ». Sur <http://sciences po.fr/ceri/sites/sciens po.fr.ceri/files/étude 45> ».
- [2] Alfredo Valladao, le retour du panaméricanisme. La stratégie des Etats-Unis en Amérique latine après la guerre froide, Paris, les cahiers du CREST, 1995.
- [3] Deblock, C. et Bunelle, D. une integration stratégique: le cas nordaméricain. Etudes internationales, <https://doi.org/10.7202/703211ar>.
- [4] ADRIENNE WARREN, les relations économiques trilatérales en Amérique du nord, Atelier ALENA. 20 mars 2003.
- [5] Deblock, C., « Le libre-échange nord-américain: le joker des Etats-Unis: <https://gam.ca/pdf/libre-echange-nord-amer> ».
- [6] Institut Jacques Delors, « L'intégration régionale en Amérique du sud », <https://institutdelors.eu/etud54-fr-ameriquelatine>.
- [7] Pierre Monbeig; les investissements Nord-Américains et l'évolution économique de l'Amérique *Annales de géographie*/Année 1955/342/pp. 106119.

Caractéristiques géologiques des formations de la vallée de Lombe du Territoire de Tshela (Province du Kongo Central, RD Congo)

[Geological characteristics of the formations of the Lombe valley of the Tshela Territory (Kongo Central Province, DR Congo)]

Nebys Mupepe Ngayipa, Patrick Mukonkole Mukonkole, Henock Tshombe Mbaya, and Wally Kimbangi Nkanu

Centre de Recherches Géologiques et Minières (C.R.G.M), 44, Av. de la Démocratie, Kinshasa, Gombe, B.P.: 898 Kinshasa 1, RD Congo

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

ABSTRACT: Studies at the macroscopic and microscopic scale of the rocks collected during the geological survey reveal that the Lombe valley is made up of green schists from which the following lithofacies have been deduced: Chloritoschist, biotitoschist, epidotite and sericitoschist. The geological and mineralogical characteristics reveal that the metamorphites of the said valley reached the biotite stage before being affected by an epizonal retromorphosis.

KEYWORDS: greenschist, chlorite, epidotite, epizonal, metamorphism.

RESUME: Les études à l'échelle macroscopique et microscopique des roches récoltées lors du levée géologique nous dévoile que la vallée de Lombe est constituée des schistes verts dont les lithofaciès ci-après ont été déduites: le Chloritoschiste, le biotitoschiste, l'épidotite et le séricitoschiste. Les caractéristiques géologiques et minéralogiques révèlent que les métamorphites de ladite vallée ont atteint le stade de la biotite avant d'être affectées par une rétomorphose épizonale.

MOTS-CLEFS: schiste vert, chlorite, épidotite, épizonal, métamorphisme.

1 INTRODUCTION

Située dans la Province du Kongo Central, territoire de Tshela, secteur de Loango, au Sud-Est de la cité de Tshela, la vallée de Lombe s'étant entre les coordonnées 13°01'00" et 13°08'22" de longitude Est et 5°08'30" et 5°10'22,6" de latitude Sud (Figure 1).

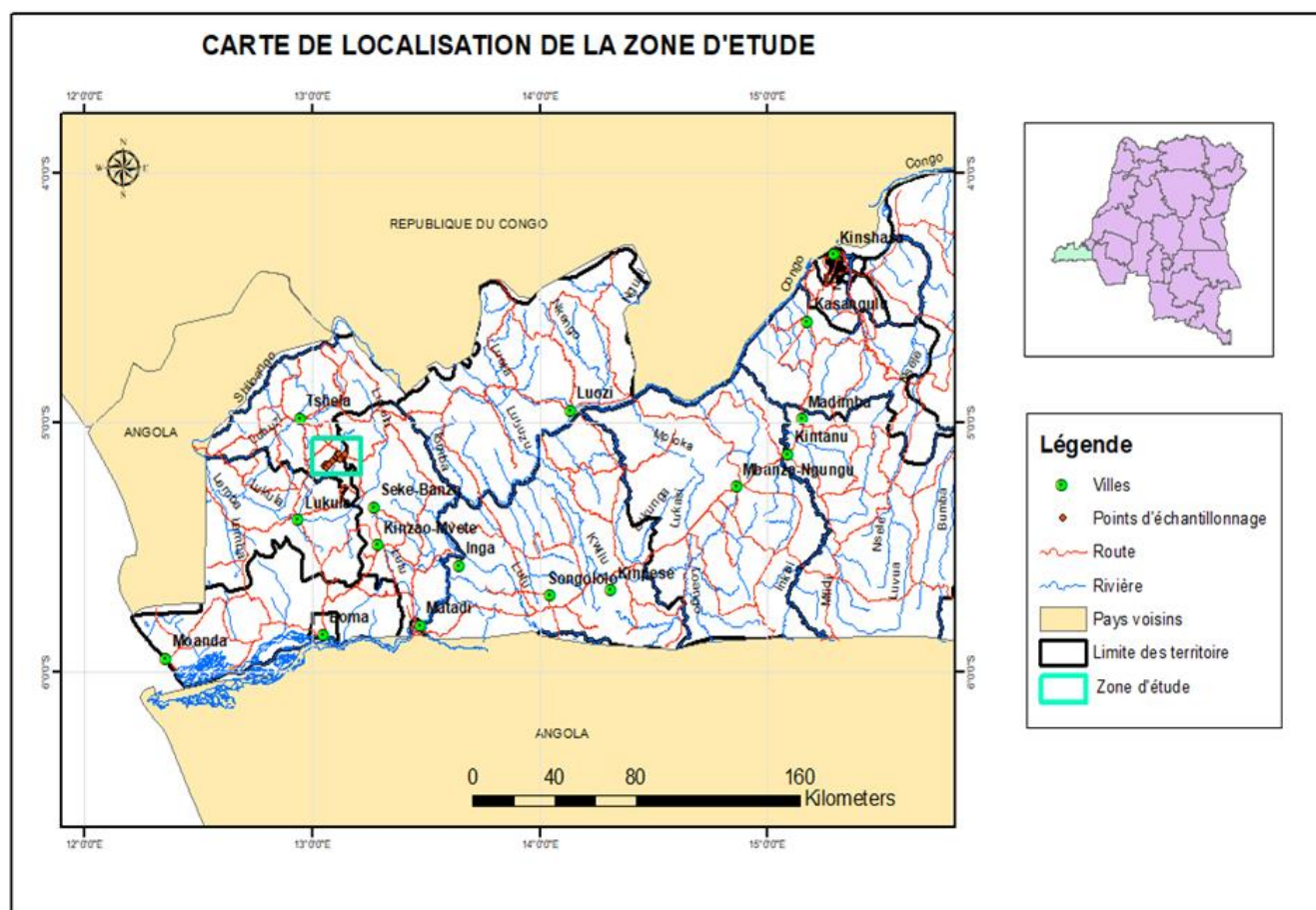


Fig. 1. Carte de localisation de la zone d'étude

Les formations géologiques sous étude appartiennent à des formations Protérozoïques recouvrant une large partie de l'Ouest de la République Démocratique du Congo. Lithostratigraphiquement, elles appartiennent aux Groupes de Matadi (anciennement Zadinien) représentant une séquence de rift continental avec un magmatisme peralcalin initial suivi d'un magmatisme bimodal étendu et de Tshela/Seke-Banza (anciennement Mayumbien) sus-jacent ne comprend que des roches volcaniques avec des roches volcano-sédimentaires et intercalations sédimentaires subordonnées qui sont, par endroits, envahies par divers granitoïdes cogénétiques dont la composition varie du monzogranite au syéno-granite et au granite à feldspath alcalin (Cahen, 1984 [1]; Tack et al., 2001 [2], Baudet et al., 2013 [3], Intiomale, 2017 [4], Mukonkole et al, 2023 [5]) (Figure 2).

L'objectif principal de cette étude est de déterminer les caractéristiques pétrographiques des roches qui affleurent le long de la vallée de Lombe afin d'identifier les éléments permettant de reconstituer l'histoire géologique de ces formations.

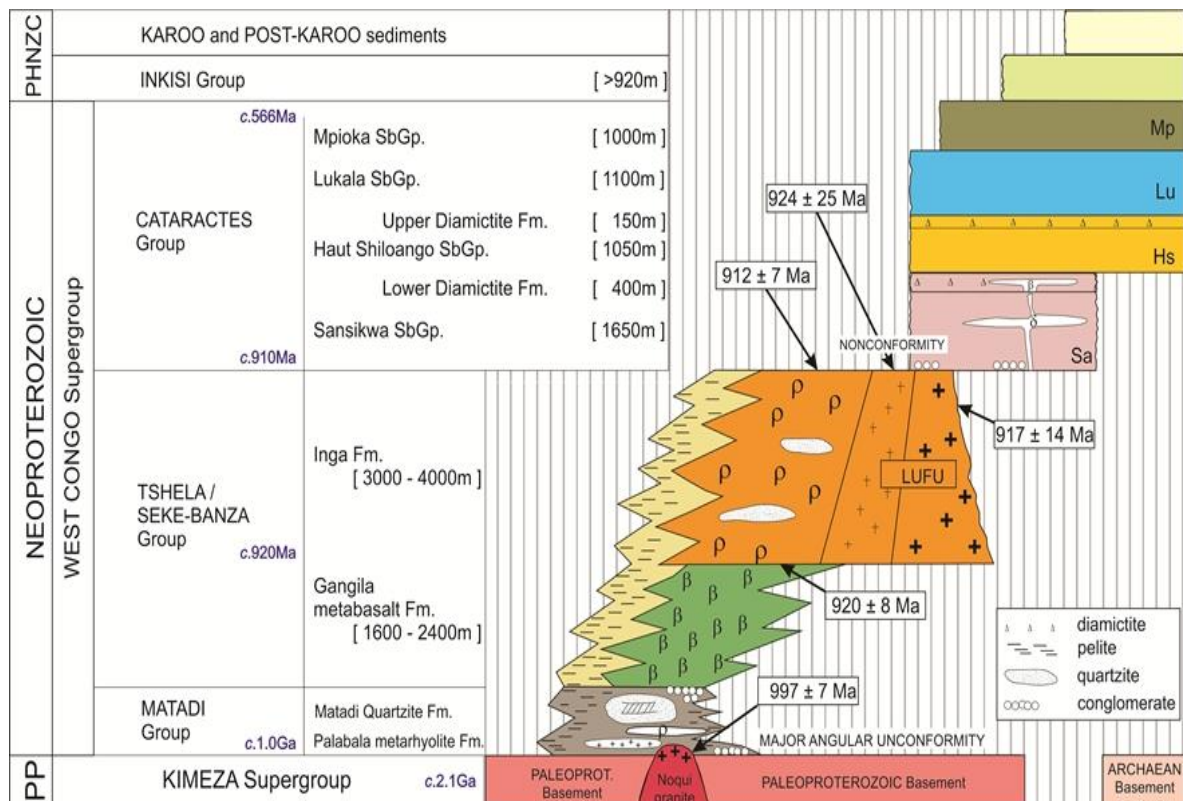


Fig. 2. Reconstruction lithostratigraphique du Supergroupe Néoprotérozoïque Ouest-Congo qui est composé de trois groupes, de bas en haut: le Groupe de Matadi, le Groupe de Tshela/Seke-Banza et le Groupe des Cataractes. Symboles: p = rhyolite; b = basalte; d = dolérite; M = Mativa; BK = Bata Kimenga (D'après Baudet et al., 2013 [3]), adaptée de Tack et al., 2001 [2]

2 MATERIELS ET METHODES

2.1 MATERIELS

La présente étude a nécessité sur le terrain l'utilisation d'un GPS de marque Garmin (GPSMAP 64s) pour le positionnement géographique des sites de prélèvement des échantillons; d'une boussole à clinomètre incorporé pour se repérer sur le terrain et pour mesurer les directions et pendages des strates observées; d'un marteau de géologue; et d'une loupe minéralogique pour l'identification des minéraux. Au laboratoire, l'usage du microscope polarisant a été d'une grande importance pour la détermination de la composition et des caractéristiques minéralogiques des roches.

2.2 METHODES

Pour réaliser cette étude, nous avons suivi le schéma classique des études géologiques, notamment une étude bibliographique, l'information pour les itinéraires favorables pour l'accès à la zone d'étude, suivies des investigations sur le terrain et des travaux de laboratoire.

Les travaux sur le terrain nous ont permis de récolter des échantillons de roches. Ces échantillons ont été amenés au laboratoire pour les études microscopiques en lames minces.

Au laboratoire, la détermination des minéraux au microscope polarisant de marque Leitz Wetzlar a été basée aux méthodes décrites par Troger, 1979 [6], Mackenzie et Adamas, 1999 [7] et Beaux et al, 2019 [8].

3 RESULTATS

La zone d'étude est constituée de quatre faciès pétrographiques principaux identifiés sur le terrain et au laboratoire. Ils sont représentés essentiellement par l'épidotite, le biotitoschiste, le chloritoschiste et le séricitoschiste.

3.1 EPIDOTITE

Elle est de couleur verdâtre à grains de quartz et feldspath blanchâtres, présentant une schistosité et un filon de quartz qui plonge vers la rivière Kimbavu (affluent de la rivière Lombe) se terminant en boudin mesurant 150 cm.

L'observation microscopique nous montre une roche à structure lépidoblastique caractérisée par des lamelles orientées de biotite. Il y a présence de quartz. L'épidote est colorée. On observe aussi le feuilletage de lamelles de muscovite autour du quartz. La zoïsité montre des teintes basses. L'épidotite observée au microscope est en forme de lentilles donnant une texture moutonnée.

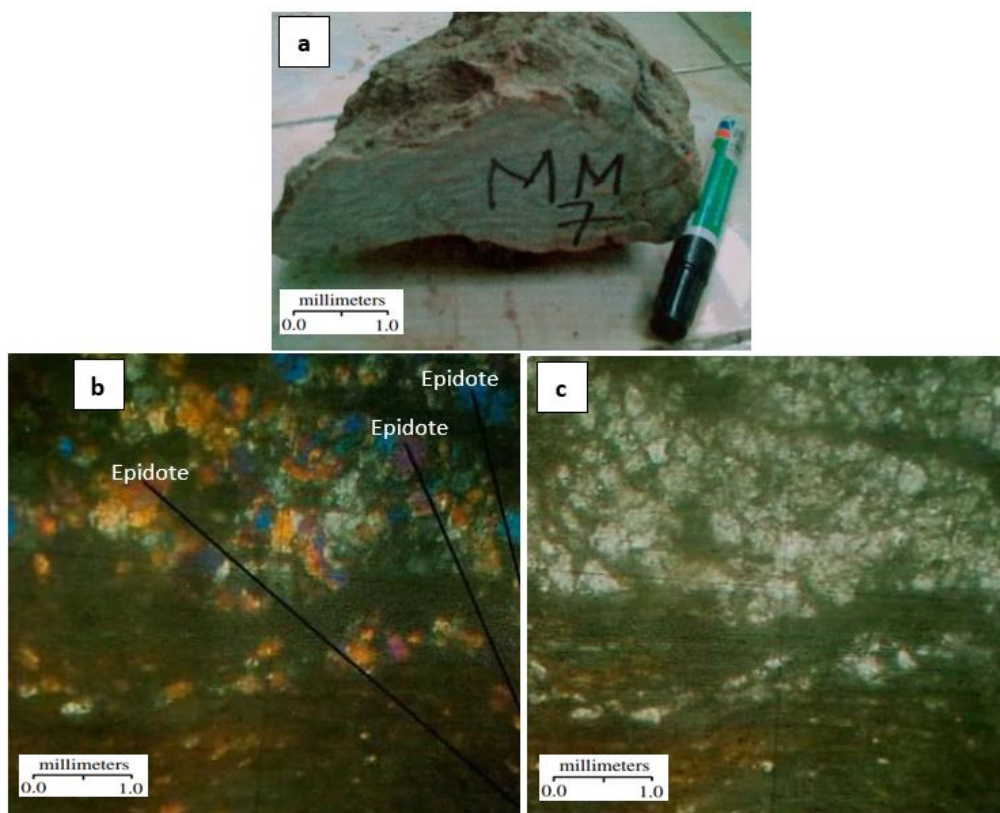


Fig. 3. (a) *Vue macroscopique de l'épidotite de la Lombe; (b) vue microscopique d'une épidotite à cristaux d'épidote colorée en lumière polarisée analysée (LPA) et (c) en lumière polarisée non analysée (LPNA)*

3.2 BIOTITOSCHISTE

A l'échelle macroscopique, la roche est de couleur jaunâtre contenant un filon de quartz. Les minéraux sont fins à moyens. Nous signalons la présence d'une foliation dans cette roche. En faciès grisâtre, les micas noirs et les grains de quartz vitreux sont des minéraux prépondérants. On observe quelques paillettes de séricite. On signale aussi la présence des minéraux sombres (opaques) à grains moyen.

Par contre en faciès gris-verdâtre, le mica noir est présent, les grains de quartz et de feldspath constitutifs sont moyens et la roche présente une schistosité.

En faciès sombre, la roche présente une foliation et contient quelques cristaux de quartz, de micas blancs, de micas noirs et de feldspaths.

En lame mince, la roche montre une prédominance de nodules de quartz. La biotite est lépidoblastique. Des minéraux opaques couvrent d'autres minéraux. Dans une autre lame, la roche présente une structure lépidoblastique. Les minéraux phylliteux (chlorite et biotite chloritisée) prédominent l'ensemble de la roche. Les minéraux opaques couvrent 10%.

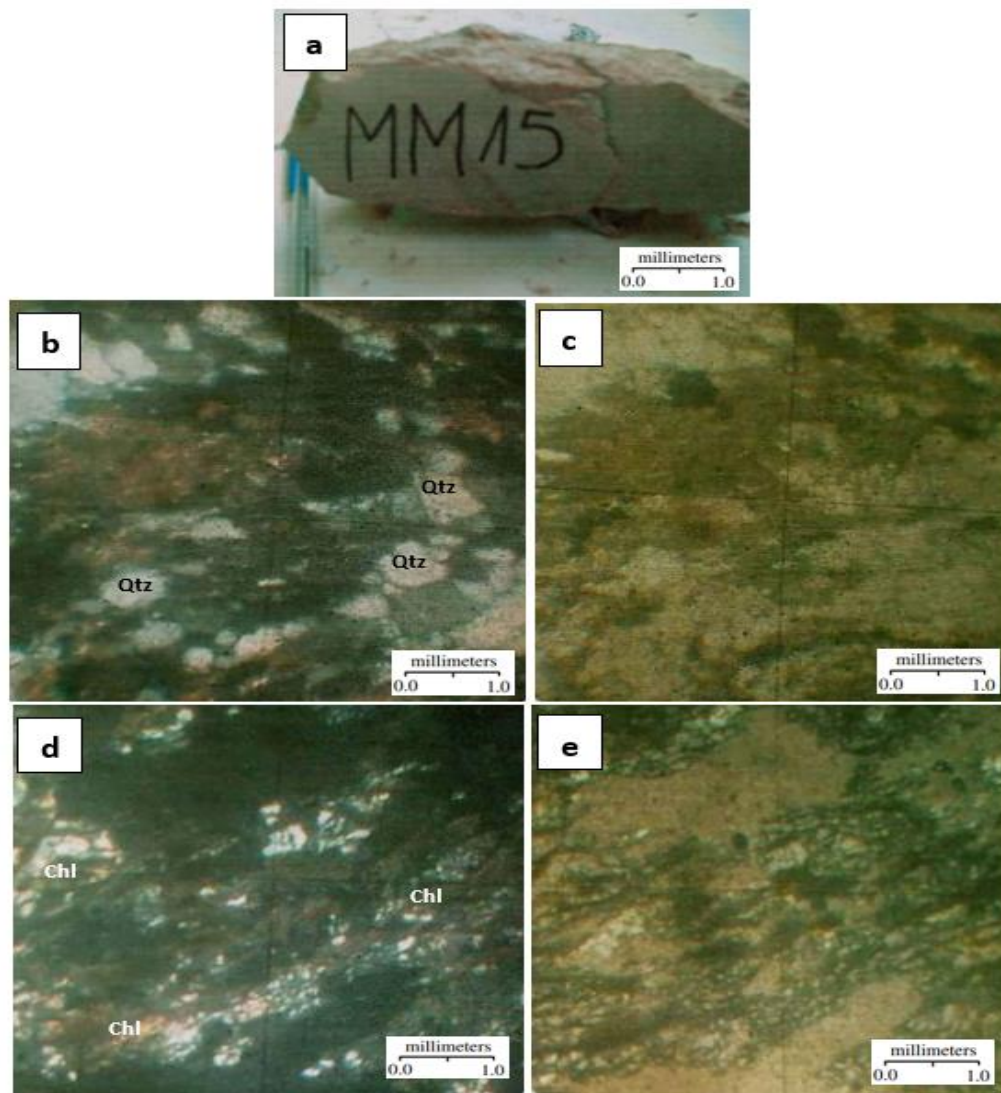


Fig. 4. (a) *Vue macroscopique du biotitoschiste de la vallée de Lombe; (b) vue microscopique du biotitoschiste à nodules de quartz en lumière polarisée analysée (LPA) et (c) en lumière polarisée non analysée (LPNA); (d) vue microscopique d'un biotitoschiste contenant des minéraux phylliteux (chlorite et biotite chloritisée) en lumière polarisée analysée (LPA) et (e) en lumière polarisée non analysée (LPNA)*

3.3 CHLORITOSCHISTE

Elle se présente en faciès gris-vert, verdâtre et sombre. En faciès gris-vert, les minéraux sont très fins dominant dans l'ensemble de la roche et se présente sous forme d'un schiste tacheté suggérant un métamorphisme de contact. On note aussi la présence d'un filon de quartz.

En faciès verdâtre, la roche présente les grains moyens et présente des tâches jaunâtres qui correspondent à des sulfures.

En faciès verdâtre, la roche présente une foliation et contient des grains de quartz vitreux qui sont visibles macroscopiquement. D'autres minéraux fins et grenus sont probablement des micas.

L'observation microscopique nous montre les minéraux les plus importants sont la chlorite et la cordiérite automorphe qui montre que nous sommes à proximité d'une intrusion acide (MM10). Certaines lames présentent une structure granoblastique. Les grains sont unigranulaires et n'ont subi aucune foliation (MM11). Une autre lame mince présente des minéraux de chlorite sans une orientation privilégiée, ce qui prouve un métamorphisme de contact. On note la présence des minéraux opaques (MM18).

Des grains de quartz uniformes, des lamelles de muscovite cernent les grains de quartz et de chlorite en plages contenant des biotites (MM19).

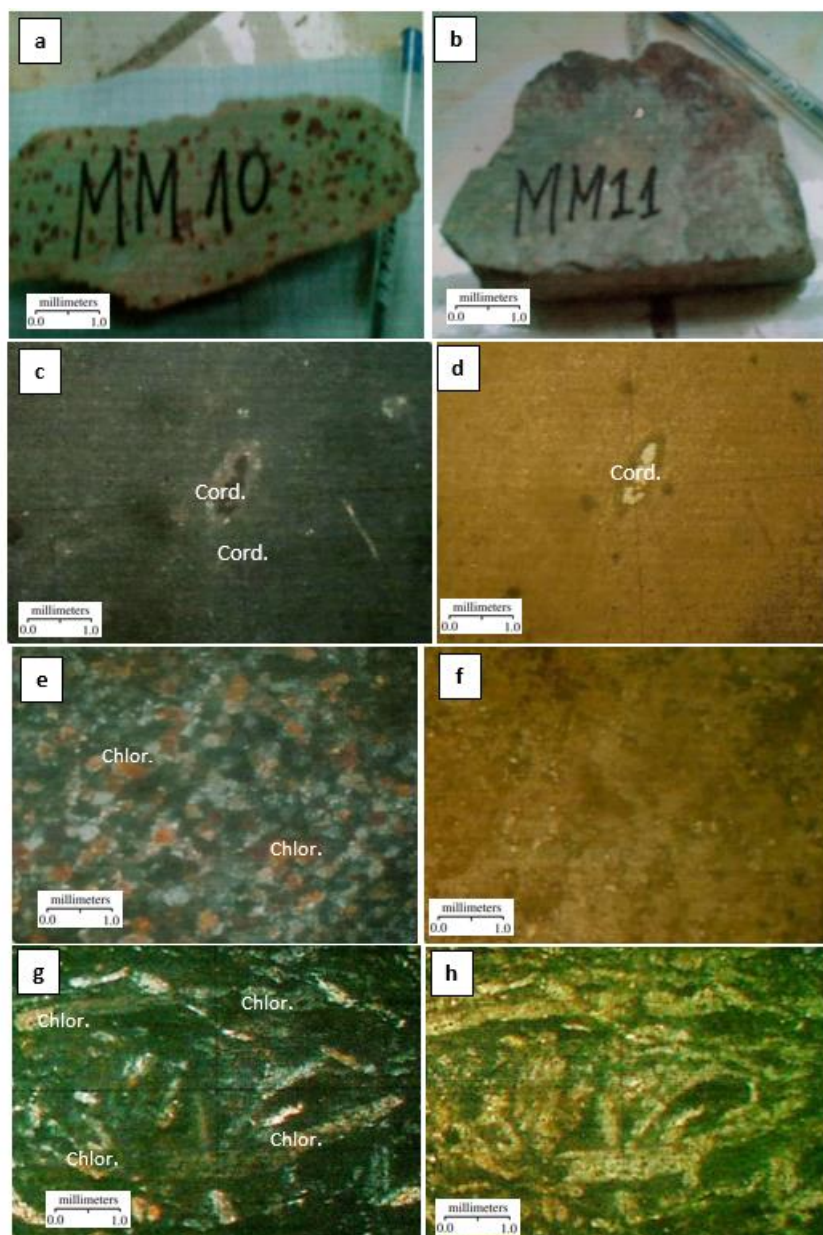


Fig. 5. (a) et (b) Vue macroscopique des chloritoschistes de la vallée de Lombe; (c) vue microscopique d'une Chloritoschiste à cordiérite automorphe en lumière polarisée analysée (LPA) et (d) en lumière polarisée non analysée (LPNA); (e) Chloritoschiste à grains unigranulaires en lumière polarisée analysée (LPA) et (f) en lumière polarisée non analysée (LPNA); (g) Chloritoschiste à minéraux sans orientation privilégiée en lumière polarisée analysée (LPA) et (h) en lumière polarisée non analysée (LPNA)

3.4 SÉRICITOSCHISTE

Il est de couleur verdâtre, présente une schistosité et contient des petits de quartz, de micas noir (biotite) et quelques cristaux de feldspath.

A l'échelle microscopique, nous observons des fines lamelles phylliteuses, des grains de quartz. Des granoblastes de la séricite montrent le début d'un métamorphisme épizonal.

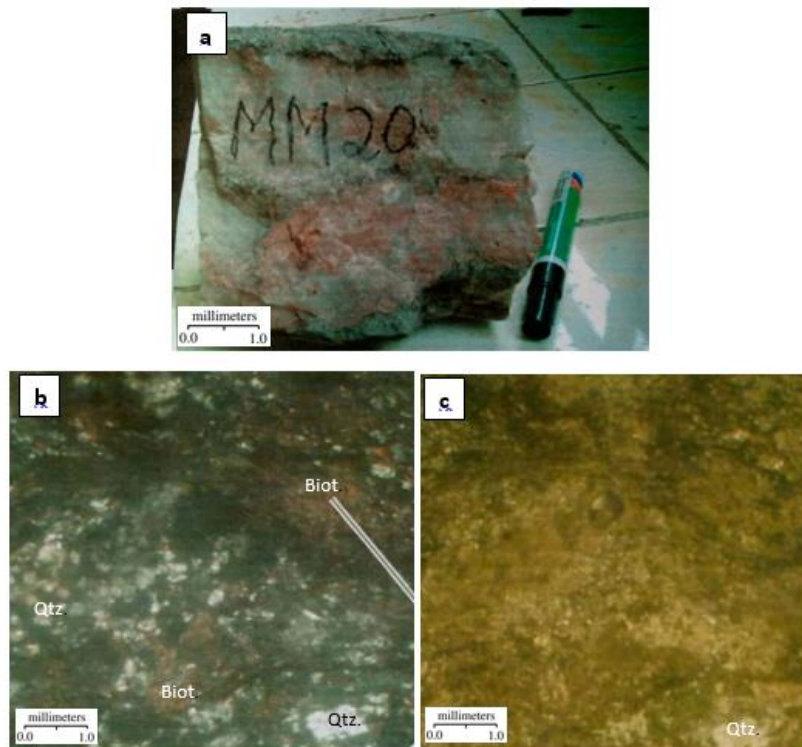


Fig. 6. (a) *Vue macroscopique d'un Séricitoschiste de la vallée de Lombe; (b) vue microscopique du séricitoschiste à fines lamelles phylliteuses en lumière polarisée analysée (LPA) et (c) en lumière polarisée non analysée (LPNA)*

4 DISCUSSION ET CONCLUSION

Les lames minces révèlent un ensemble de roches transformées comprenant des chloritoschistes à biotites, des biotitoschistes chloritisés dont certains ayant subi une foliation visualisée par des lamelles de séricite cernant des agrégats de biotite et de quartz, ainsi que des séricitoschistes à biotite.

Ces roches sont typiques du faciès métamorphique des schistes verts (greenschist facies) caractérisées par la présence de la chlorite et de séricite au sein des différentes paragenèses minérales identifiées (Nicollet, 2010 [9]). En outre cette chlorite qui caractérise les schistes verts prouve à suffisance que notre zone d'intérêt a été affecté par un métamorphisme de faible intensité tel que suggéré par Miyashiro (1957) [10], Deer et al. (1966) [11] et Winkler (1974) [12].

La vallée de la Lombe dans la région de Kangu contient des métamorphites ayant atteint le stade de la biotite avant d'être affectées par une rétro-morphose épizonale marquée par des chloritoschistes (Hayama, 1959 [13], Cahen et al., 1976 [14], Delhal et Ledent, 1976 [15], Tshombe et al, 2024 [16]). Le milieu de dépôt était agité, ayant formé des lentilles conglomératiques quartzeuses et épidotitiques intraformationnelles.

Enfin, des intrusions tardi-orogéniques auront marqué localement les métamorphites par un métamorphisme thermique à cordiérite.

REFERENCES

- [1] Cahen, L.; Snelling, N.J.; Delhal, J. and Vail, J.L. *The Geochronology and Evolution of Africa*. Clarendon Press. Oxford, 512 p., 1984.
- [2] L. Tack, M.T.D. Wingate, J.-P. Liegeois, M. Fernandez-Alonso, A. Deblond, «Early Neoproterozoic magmatism (1000-910 Ma) of the Zadinian and Mayumbian Groups (Bas-Congo): onset of Rodinia rifting at the western edge of the Congo craton», *Precambrian Research*, 110, 277-306, 2001.
- [3] Baudet; M. Fernandez-Alonso; K. F. Kant; L. Tack; K. Theunissen; S. Dewaele; K. Eekelers; G. Kadja; E. Mujinga; P. Nseka; J. Phambu; N. Kitambala; E. Kongota; J. Matungila; M. Muanza Et A.M. Tshibwabwa., *Notice explicative de la carte géologique de la Province du Bas-Congo et Carte géologique à l'échelle du 1/500.000, Version 1.0*, MRAC (Belgique) – CRGM (R.D. Congo), 50p., 2013.

- [4] M.M Intiomale, «Des filons de quartz et de baryte de tendance alcaline, repères des zones d'émergence des failles de rift au Kongo Central (R.D. Congo)», *Ann. Fac. SC.*, Vol. 1, 99-108, 2017.
- [5] P. Mukonkole, D. P. Ilito, H. Tshombe, N. Mupepe, J-A Opey, O. Mukaka, and A-M Tshibwabwa. Etude des paragenèses minérales des roches vertes de la vallée de M'vunzi du Territoire de Seke-Banza (Province du Kongo Central, RD Congo). *International Journal of Innovation and Scientific Research*, Vol. 65, No. 1, pp. 48-60.
- [6] W.E. TROGER, *Optical determination of rock forming minerals*, English Edition of the 4th German Edition, Stuttgart, 1979.
- [7] W.S. MACKENZIE Et A.E. ADAMAS, *Initiation à la pétrographie*, Dunod, Paris, 1999.
- [8] J-F Beaux, B. Platevoet, J-F Fogelgesang, *Atlas de géologie-pétrologie*, 3è Ed., Dunod, Paris, 2019.
- [9] C. Nicollet, *Métamorphisme et géodynamique*, Dunod, Paris, 2010.
- [10] A. Miyashiro, «Chlorite of crystalline schists», *J. geol. Soc. Japan*, 63, 1-8, 1957.
- [11] W. Deer, G. Howie and J. Zussman, *An introduction to the rock forming minerals*, Longman, London, 528 p, 1966.
- [12] M. G. Winkler, *Petrogenesis of metamorphic rocks*, Springer Verlag, New- York, 334 p, 1974.
- [13] Y. HAYAMA, «Some considerations on the colour of biotite and its relation to metamorphism, » *Jour. Geol. Soc. Japan* 65, vol. 2, (760), pp. 21–30, 1959.
- [14] L. Cahen, J. Delhal et D. Ledent, «Chronologie de l'orogénèse ouest-congolienne (Pan-Africaine) et comportement isotopique de roches d'alcalinité différente dans la zone interne de l'orogénèse, au Bas-Zaïre», *Ann. Soc. Géol. Bel.*, 99, 189-203, 1976.
- [15] Delhal, J. et Ledent, «Age et évolution comparée des gneiss migmatitiques près-Zadiniens des régions de Boma et Mpozo Tombagadio (Bas-Zaïre)», *Ann. Soc. Géol. Belg.*, 99, 165-187, 1976.
- [16] H. M. Tshombe, B. M. Minzadi, C.M. Mawanzo, P. M. Mukonkole, F-W. A Simbundu, «Paragenèses minérales des métamorphites de Nganda-Tsundi et ses environs (Degré Carré de Tshela, Province du Kongo Central, République Démocratique du Congo)», *International Journal of Innovation and Applied Studies*. Vol. 43 No. 2, pp. 488-502, 2024.

Approche d'adressage et de cartographie des accidents de la circulation en l'absence d'un system formel de dénomination des rues: Cas de la commune de Yopougon (Abidjan, Côte d'Ivoire)

[Approach to addressing and mapping traffic accidents in the absence of a formal street naming system: Case of the commune of Yopougon (Abidjan, Côte d'Ivoire)]

Aubin Kouassi YAO-NANAN¹, Christian Gnagui ADON², Patrice N'Guessan AKOGUHI³, Justin Kouadio KONAN⁴, and Fernand Koffi KOUAME⁵

¹Université Felix Houphouët-Boigny, Unité de Formation et de Recherches (UFR) des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Centre Universitaire de Recherches et d'Application en Télédétection (CURAT), 22 BP 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

²Université Felix Houphouët-Boigny, Unité de Formation et de Recherches (UFR) des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Centre Universitaire de Recherches et d'Application en Télédétection (CURAT), 22 BP 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

³Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, Unité de Formation et de Recherche (UFR) Environnement, Laboratoire des Sciences et Technologie de l'Environnement (LSTE), Département de Physique Chimie Mathématique Informatique, 02 BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire

⁴Université Felix Houphouët-Boigny, Unité de Formation et de Recherches (UFR) des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Centre Universitaire de Recherches et d'Application en Télédétection (CURAT), 22 BP 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

⁵Université Virtuelle de Côte d'Ivoire, Unité de Recherche et d'Expertise Numérique (UREN), 28 BP 536 Abidjan 28, 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 objective of this research is to optimize the management of accident-causing data by taking into account the geographical coordinates of accident sites. To do this, Google Maps, Google Earth and satellite positioning system receivers were used. These geospatial tools made it possible to attribute post-disasters, geographical coordinates to road traffic accidents in the municipality of Yopougon recorded by the road safety office in a context of lack of formal street addressing between the years 2016 and 2018. Then, by concatenating the geographical coordinates, in particular the latitude and longitude, the accident sites with identical coordinates were grouped together. A total of 3165 accidents with 2707 nominal addresses were geocoded, including 1694 serious accidents with 1138 nominal addresses. Serious accidents are accidents with at least one serious injury or death. The concatenation of the coordinates made it possible to group the 2707 nominal addresses into 280 places and particularly the 1138 into 251. That is 90% and 80% respectively gains for better analyses later. It has also reorganised the classification of accident-prone places. In conclusion, the geocoding of accidents and the concatenation of geographical coordinates that it allows improves the quality of basic statistical data for classical and spatial downstream analyses.

KEYWORDS: Geocoding, concatenation, latitude, longitude, Google Maps, Google Earth, positioning, satellite.

RESUME: L'objectif de cette recherche est d'optimiser la gestion des données accidentogènes par la prise en compte des coordonnées géographiques des lieux d'accidents. Pour se faire, Google Maps, google Earth et les récepteurs de systèmes de positionnements par satellites ont été utilisés. Ces outils géospatiaux ont permis d'attribuer post sinistres, des coordonnées géographiques aux accidents de la circulation routière de la commune de Yopougon enregistrés par l'office de la sécurité routière dans un contexte d'absence d'adressage formel des rues entre les années 2016 et 2018. Ensuite, par la concaténation des coordonnées géographiques en particulier des latitude et longitude, les lieux d'accidents aux coordonnées identiques ont été regroupés. En tout, 3165 accidents de 2707 adresses nominales ont été géocodés parmi lesquels 1694 accidents graves de 1138 adresses nominales. Les accidents graves sont les accidents avec au moins un blessé grave ou un tué. La concaténation des coordonnées a globalement permis de regrouper les 2707 adresses nominales en 280 lieux et particulièrement les 1138 en 251. Soit respectivement 90 % et 80 % de gains pour de meilleures analyses ultérieures. Elle a également réorganisé le classement des lieux accidentogènes. En conclusion, le géocodage des accidents et la concaténation des coordonnées géographiques qu'elle autorise améliore la qualité des données statistiques de bases pour les analyses classiques et spatiales en aval.

MOTS-CLEFS: Géocodage, concaténation, latitude, longitude, Google Maps, Google Earth, positionnement, satellite.

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

La cartographie des accidents de la route est relativement récente comparativement aux premières heures de l'analyse spatiale où Snow cartographie pour la première fois une épidémie de choléra à Londres [1]. Selon Vandersmissen *et al* [2], les précurseurs de la cartographie des accidents de la route sont Mollering [3] qui a effectué une analyse spatiale des accidents de la route survenus en 1969 au Michigan aux États Unis d'Amérique et Pampalon [4] qui a étudié la géographie de la mortalité sur les routes du Québec. Depuis, plusieurs auteurs ont suivi jusqu'à ce jour et les méthodes utilisées pour la localisation des accidents en vue de leur cartographie ont évolué. Selon Labonté, il existe essentiellement deux méthodes: les méthodes dites traditionnelles et les méthodes basées sur les systèmes de positionnements par satellite [5].

Les méthodes traditionnelles procèdent par localisation de l'accident à partir d'un élément dans l'environnement du sinistre (adresse postale, position sur une rue, distance par rapport à un carrefour, une borne kilométrique, un monument ou édifice important...). Ici, il n'y a pas de relevées de coordonnées géographiques sur le terrain. C'est plus tard, à l'étape de la cartographie que les géographes essaient de faire correspondre les repères de terrains sur les cartes. Ces cartes peuvent être soit physiques (murales ou sur table) soit numériques (SIG: Systèmes d'Informations Géographiques intégrés dans les ordinateurs. L'équivalent de la méthode traditionnelle utilisée aux États Unis d'Amérique (USA) est connu sous le nom de Linear Referencing (référencement linéaire) [6]. Huguenin-Richard détaille l'utilisation de la méthode traditionnelle basée en France sur le logiciel de résolution des adresses postales et coordonnées géographiques CONCERTO après les constats et repérages sur le terrain [7].

Les systèmes de positionnements par satellite (en anglais: Global Navigation Satellite System -GNSS-) fonctionnent par triangulation de 03 satellites (au moins) pour déterminer la position des cibles au sol sous forme de coordonnées géographiques. A ce jour, il en existe quatre (04): le GPS américain, le Glonass russe, le Baedou chinois et le Galileo européen. Leur exploitation en accidentologie consiste soit à relever les coordonnées géographiques sur les lieux du constat à l'aide de récepteurs au sol, soit elles le font par utilisation des services des applications de cartographies en ligne telle que Google Maps, Google Earh,...etc sur les lieux de l'accident ou ultérieurement. Dans tous les cas, *in fine*, un lien est établi entre ces coordonnées géographiques et un important point de repère proche car le commun des utilisateurs retient et se retrouve mieux avec les noms qu'avec les chiffres.

L'étude de Mansouri *et al.* montre que l'utilisation du GPS pour localiser les accidents de la circulation est rentrée progressivement dans les habitudes en France entre 2005 et 2016 en passant de 14% à 70% d'emploi lors des constats de sinistres [8]. Mais les auteurs précisent qu'il s'agit-là d'une moyenne nationale car dans les détails des départements, la fourchette part de 0 à un peu plus de 98% pour la dernière année 2016; ce qui montre que même pour un pays développé, l'utilisation du GPS dans la localisation des accidents de la circulation routière reste une gageure.

Les signaux et systèmes de positionnements par satellite sont généralement regroupés sous le vocable GPS (Global Positioning Système) pour le commun des utilisateurs car le système américain a été le précurseur. Mais le terme inclusif et

fédérateur dans le monde professionnel est GNSS (Global Navigation Satellite System) pour tenir compte des Russes, des Chinois et des Européens. Afin de faire simple dans la suite de l'article, nous utiliserons le terme GPS pour faire référence aux GNSS étant donné que ce vocable s'est naturellement imposé dans le milieu.

Contrairement aux méthodes basées sur les nouvelles technologies qui requièrent pour leurs exploitations des terminaux électroniques (ordinateurs, récepteurs GPS) et donc onéreuses à grande échelle d'exploitation, les méthodes dites traditionnelles, basées sur les repères environnementaux, requièrent moins de moyens technologiques; elles sont à la portée de tous et sont moins onéreuses. Cependant, elles peuvent s'avérer difficiles à exploiter (en rase campagne par exemple) lorsque les repères sont inexistantes ou très éloignés (points kilométriques éloignés ou inexistence d'infrastructures de références). Dans ces situations, les estimations faites sont souvent imprécises. Par ailleurs, la multiplicité des points de repères dans le système traditionnel (points kilométriques, carrefours, édifices célèbres) entraîne-t-elle un manque de cohérence dans les bases de données lorsque toutes ces données sont mises ensemble. Des constats similaires faits par Kim *et al.* les ont emmenés à proposer la localisation des accidents par GPS (méthode moderne) comme solution pour répondre à la problématique de l'uniformisation de la méthodologie d'enregistrement des accidents de la circulation [9].

Les méthodes basées sur les nouvelles technologies par relevés GNSS qu'elles le soient par utilisation de récepteurs sur terrain ou à travers les applications en ligne sont plus précises que les traditionnelles. Dans tous les cas, ces méthodes de localisations des accidents de la circulation routière (traditionnelles ou modernes) reposent sur un système cohérent d'adressage des rues car mêmes les coordonnées GPS qui s'en affranchissent au départ, doivent les intégrer in fine en afin d'être plus parlantes pour les hommes.

1.2 PROBLÉMATIQUE

Les pays africains ne bénéficient généralement pas de systèmes d'adressages de rues cohérents. Si très peu d'écrits officiels en parlent, le site web de Edenmap [10], note que sur ce continent, même lorsque les dénominations existent pour certaines rues, ces dernières sont méconnues des citoyens car les appellations sont souvent imposées de manière descendante, sans implication des populations locales ni prise en compte de l'histoire sociale des lieux. Ce constat de Edenmap est partagé par Ecobuilder [11]. Wanguep sur linkedin quant à lui note que plus de quatre milliards de personnes dans 135 pays son sans adresse officielle, notamment en Afrique [12]; il rejoint ainsi en d'autres mots les deux premiers. Ainsi, ces trois intervenants sont-ils unanimes sur la problématique du système d'adressage des rues en Afrique. Or nous nous sommes rendus à l'évidence plus haut que les deux méthodes de localisation reposent sur un système cohérent d'adressage des voies de circulations routières. En effet, l'absence d'un système formel de dénomination des rues constitue un obstacle majeur à une gestion efficace des accidents de la circulation. Cette situation complique l'identification et le suivi des lieux d'accidents car chaque agent de constatation de sinistre attribut au lieu d'accident, le nom du repère dans l'environnement proche qui lui convient (pharmacie, station, école, supermarché... pour le même lieu). Cela entraîne une dispersion des données sous différentes appellations qui s'amplifie au fil des années et rend difficile l'analyse et la prévention des risques routiers. Dans un tel contexte, comment géocoder et étudier en vue d'extraire des informations pertinentes, les accidents de la route déjà enregistrés sur des années sans coordonnées géographiques par la méthode traditionnelle et comment envisager la transition vers la méthode moderne en l'absence de ce préalable? Jusque-là, la question ne s'est pas posée avec acuité parce que dans ces pays en général, les accidents de la circulation routière ne sont pas cartographiés en vue d'analyses géospatiales, mais ces parties du monde qui portent en elles les taux d'accidents les plus élevés [13] ne peuvent pas continuer à s'affranchir des atouts pertinents des outils d'analyses géostatistiques pour des phénomènes à localisation géographique tels que les accidents de voies publiques. Cet article, en vue de surmonter ces difficultés pour améliorer la gestion des accidents et la sécurité routière dans les zones urbaines envisage, sur l'exemple de la commune de Yopougon (utilisée comme site pilote), de proposer une méthode de localisation des accidents de la circulation routière afin de permettre la conception de bases de données géocodées des accidents de voie publique, préalable à leur cartographie et analyses spatiales dans un contexte d'adressage de rues inexistant ou incohérent.

A l'entame de nos travaux, nous présumons par hypothèse, que la solution mixte de localisation des accidents par géocodage (liaison coordonnées géographiques -repères environnementaux) permettra de réorganiser et d'apporter une plus-value aux données d'accidents de base en les rendant plus cohérentes. En effet, de nombreux points d'accidents qui paraissent distincts de par leurs noms ou leurs points référents peuvent être en réalité des « homonymes-géographiques (même coordonnées géographiques) » et donc être agrégés (regroupés) pour effectuer des statistiques plus proches de la réalité.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1 MATÉRIEL

Le matériel utilisé pour réaliser cette étude est composé de trois récepteurs GPS Garmin GPSMAP 66sr multiband pour les relevés de coordonnées géographiques. Ce type de récepteur GPS est multi bandes; il prend en compte les systèmes GPS (américain), GLONASS (russe), Galileo (européen) ce qui lui permet d'offrir une précision de positionnement d'un (01) mètre. Le matériel de traitement de données se résume à l'outil informatique formé d'un micro-ordinateur de marque HP pavillon (processeur AMD A6-5200 APU muni du Radeon (TM) HD Graphics 2.00 GHz, mémoire RAM 12 Go, Système d'exploitation Windows 10 professionnel 64 bits et 500 GB de mémoire de disque dure). Ce micro-ordinateur est équipé du tableur Microsoft Excel pour le recueil des données statistiques de bases relatives aux sinistres constatés, du logiciel de statistiques R pour le prétraitement de ces données et du logiciel de cartographie Arcgis pour la cartographie des points d'accidents. L'accès de ce micro-ordinateur à internet a également permis à travers les plateformes google Maps et google Earth les relevés de coordonnées des accidents en combinaison avec les récepteurs GPS précités. Pour les relevés GPS sur terrain, deux véhicules ont servi aux déplacements sur les lieux. Enfin, les données de départ ont concerné d'une part les statistiques de bases en fichier Excel relatives aux accidents constatés sur les années 2016-2017-2018 au sein de la ville d'Abidjan et d'autres parts la carte de la commune de Yopougon (en fichier Shape) avec son découpage en sous-quartiers et de la couche du réseau routier. Les statistiques sur les sinistres d'accidents ont été obtenus auprès de l'office de la sécurité routière (OSER) de la Cote d'Ivoire. Le fond de carte de la commune de Yopougon a été obtenu auprès du laboratoire de recherche CURAT de l'Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan.

2.2 MÉTHODE

Pour répondre à la problématique, la méthode adoptée a été appliquée à Yopougon, commune la plus peuplée, la plus vaste et la plus accidentogène de la ville d'Abidjan et du pays sur les années 2016 à 2018, périodes pour lesquelles les données étaient disponibles à l'entame de l'étude.

Il a été question de montrer que le géocodage des accidents permet de mieux organiser les données accidentogènes de bases et donc d'offrir une meilleure matière première pour de meilleures statistiques en aval. Comme l'atteste la figure 1, la réalisation de la base de données géocodée des accidents a été faite en trois étapes: i) d'abord l'écriture d'un algorithme de prétraitement des données accidentogènes brutes pour extirper les doublons de données et rendre cette première base plus logique, ii) ensuite l'attribution de coordonnées géographiques par la méthode moderne et iii) enfin l'harmonisation de la base géocodée par concaténation de coordonnées géographiques en vue de regrouper des « homonymes géographiques » c'est-à-dire les points ayant les mêmes coordonnées géographiques mais d'appellations différentes. Ces deux dernières étapes permettent de palier aux insuffisances de la base non géocodée. La comparaison des bases de données non géocodées et géocodées permet de montrer la supériorité de la seconde sur la première.

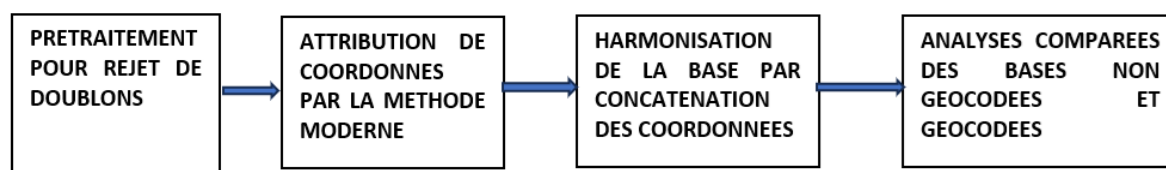


Fig. 1. Schéma synoptique de la méthode de mise en place de la base de données géocodées

2.2.1 MÉTHODE DE PRÉTRAITEMENT

Deux types de doublons ont été définis: les « doublons parfaits » et les « doublons imparfaits ». Les « doublons parfaits » sont deux ou plusieurs lignes (enregistrements) pour lesquelles toutes les cellules liées aux mêmes colonnes sont identiques deux à deux. On dit qu'elles ont été dupliquées. Le tableau 1 en est une illustration.

Tableau 1. Exemple d'enregistrement où toutes les cellules de la même colonne sont identiques deux à deux

NUM ORDRE	DATE	HEURE	LIEU EXACT	CIRCONSTANCE	TUES TOTAL	BLESSES GRAVES TOTAL	BLESSES LEGERS TOTAL
01	02/01/16	19:00	carrefour lubafrique	Défaut de maitrise	0	0	1
02	02/01/16	19:00	carrefour lubafrique	Défaut de maitrise	0	0	1

Les « doublons imparfaits », exemple du tableau 2 sont les lignes pour lesquelles des cellules essentielles et discriminatoires pour une thématique donnée sont identiques sans que le reste ne le soit. Pour la thématique des accidents, si on constate dans les enregistrements, deux ou plusieurs accidents survenus au même endroit et au même moment mais avec des bilans et/ou des causes différentes, alors deux cas de figures se présentent: soit il s'agit du même accident mal enregistré plusieurs fois en leurs bilans et/ou circonstances, soit il s'agit d'accidents différents mal enregistrés dans le temps et dans l'espace car en un point et à un instant donnés, il ne peut se produire qu'un seul accident.

Tableau 2. Exemple d'enregistrements où les cellules des colonnes date, heure, lieu exact sont identiques deux à deux et le reste différent

NUM ORDRE	DATE	HEURE	LIEU EXACT	CIRCONSTANCE	TUES TOTAL	BLESSES GRAVES TOTAL	BLESSES LEGERS TOTAL
01	02/01/16	19:00	carrefour lubafrique	Défaut de maitrise	0	1	1
02	02/01/16	19:00	carrefour lubafrique	Imprudence du conducteur	0	2	3

Lorsque c'est le cas, nous retenons le terme « doublons imparfaits » et un arbitrage est à faire pour lever le doute. La fonction de rejet de doublons intégrée dans la plupart des tableurs permet de déceler et rejeter les « doublons parfaits » mais pas les « doublons imparfaits », un programme a été développé sous le logiciel de statistiques R (version 4.2.0) pour se faire. L'algorithme du programme est le suivant:

- Soit DH = date heure, LI = lieu, CI = circonstances, TU = tues, BG = Blesses graves, BL = Blesses légers
- Soit i la ligne d'enregistrement de l'accident i
- Si $DH_{i1} = DH_{i2}$ et $LI_{i1} = LI_{i2}$ alors renvoyer en rouge dans la colonne observations « attention il s'agit peut-être d'un accident déjà enregistré, veuillez effectuer un arbitrage » sinon renvoyer « OK »

En fin de traitements, les lignes marquées OK ne nécessitent pas d'attentions particulières par contre celles marquées « attention il s'agit peut-être d'un accident déjà enregistré, veuillez effectuer un arbitrage » vont conduire à la consultation des archives de l'OSER (procès-verbaux des agents de constats gendarmerie-polices) pour lever les doutes.

2.2.2 MÉTHODE D'ATTRIBUTION DE COORDONNÉES

Elle se fait par relevées de coordonnées. Les outils de relevés sont: google maps, google earth, récepteurs GPS. Lorsque les lieux concernés par les accidents étaient connus de la plateforme google maps sans confusion possible, cette dernière était utilisée pour relever les coordonnées. Lorsqu'il y avait ambiguïté, google earth était utilisé.

Le choix entre google maps et google earth repose sur le principe de temps de chargement des données donc de rapidité d'exploitation de ces applications en ligne. En termes de données, Google Maps s'appuie sur des fichiers Shape pendant que google earth pour les mêmes détails s'appuie sur de la photographie satellitaire. Les shapes étant plus légers en termes de capacités que les photos et donc plus rapides à charger, leur plateforme a été privilégiée par rapport à google earth qui elle a été réservée pour lever les doutes de google maps.

Pour les lieux inconnus des bases de données de google Maps et google Earth, les coordonnées géographiques ont été relevés par récepteurs GPS suite à des enquêtes terrains auprès de structures ressources telles que la Gendarmerie, la Police et les syndicats de transporteurs. Ci-dessous, le logigramme de la méthode d'attribution des coordonnées géographiques.

2.2.3 METHODE D’HARMONISATION DE LA BASE GEOCODEE PAR CONCATENATION DES COORDONNEES

Les coordonnées géographiques d’un même lieu peuvent avoir plusieurs noms de baptêmes en fonction du repère auquel ce lieu fait référence dans la zone. Si un nom de baptême unique n’est pas donné à ce point, les méthodes et les logiciels de statistiques classiques (statistiques des tendances, R, SPHINX, SPSS,...) dans leurs exploitations les considèrent comme des points différents et cela fausse les analyses. Une harmonisation de la base s’avère nécessaire. Le principe consiste à réussir à attribuer un code univoque à chaque lieu et à raisonner sur ce code plutôt que sur les différentes appellations nominales. La première idée a consisté à ne raisonner que sur la latitude d’un lieu en lui attribuant cette coordonnée comme code. Mais nous nous sommes vite aperçu que cela conduirait à des confusions puisque plusieurs lieux différents peuvent être situés sur le même méridien (latitudes identiques même si les longitudes sont différentes). Il en est de même si l’on veut retenir la longitude. La solution conceptuelle était donc de réussir à générer un code unique pour chaque lieu à partir d’une manipulation ou combinaison des deux coordonnées géographiques (latitude-longitude) puis à rebaptiser ce lieu en choisissant une seule appellation parmi toutes celles en usage. La technique trouvée après plusieurs approches complexes infructueuses a été l’exploitation de l’opérateur concaténation des nombres en mathématique. Ainsi, en concaténant la latitude et la longitude d’un lieu, on lui attribue un code unique qui le caractérise de façon univoque. En effet, deux ou plusieurs endroits différents peuvent avoir soit la même latitude (situés sur le même parallèle) soit la même longitude (situés sur le même méridien), mais jamais les deux à la fois (jamais sur la même intersection) sinon, il s’agira du même lieu nommé autrement ou plusieurs fois (figure 2).

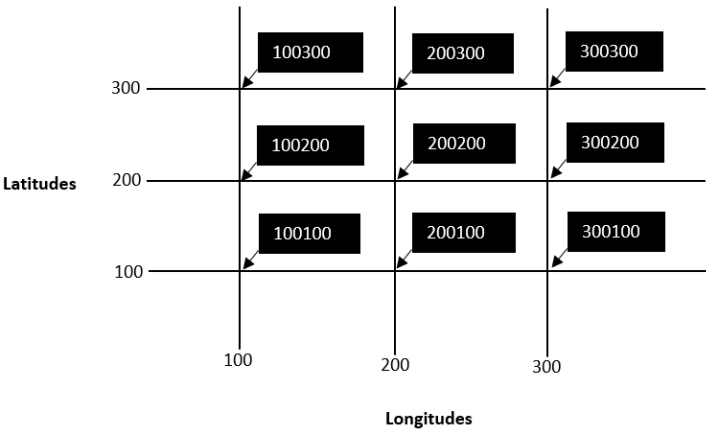


Fig. 2. Principe de caractérisation des points du globe par leurs coordonnées géographiques concaténées

Ensuite, les codes univoques étant des nombres, ont réorganisé la base de données des accidents en classant ces codes par ordre croissant. Les lieux ayant des appellations différentes mais de mêmes coordonnées géographiques donc ayant le même code univoque vont se suivre l’un après l’autre dans la base. A partir de là, on choisit parmi les appellations, le nom de baptême le plus approprié et on l’attribue par affectation aux autres lignes d’enregistrements. Le tableau 3 est une récapitulation de la méthode d’harmonisation de la base.

Tableau 3. Récapitulation de la méthode d’harmonisation de la base

LATITUDE	LONGITUDE	CONCATENATION	APPELLATIONS D’USAGES	APPELATION RETENUE
100	100	100100	A, B, C	A
100	200	100200	D, E, F	D
100	300	100300	G, H, I	G
200	100	200100	J, K, L	J
200	200	200200	M, N, O	M
200	300	200300	P, Q, R	N
300	100	300100	S, T, U	S
300	200	300200	V, W, X	V
300	300	300300	Y, Z1, Z2	Y

Les étapes de l'harmonisation de la base sont:

- 1- Attribution de codes univoques aux adresses d'accidents par concaténation des coordonnées géographiques
- 2- Classement des codes
- 3- Regroupement des codes identiques
- 4- Affectation d'un nom de baptême unique à chaque code_nombre

Pour recapituler, les étapes de réalisation de la base de données géocodées sont:

- 1- Prétraitements
- 2- Relevés de coordonnées géographiques
- 3- Attribution de codes univoques aux adresses d'accidents par concaténation des coordonnées géographiques
- 4- Classement des codes
- 5- Regroupement des codes identiques
- 6- Affectation d'un nom de baptême unique à chaque code_nombre

2.2.4 ANALYSES COMPAREES DES BASES GEOCODEES ET NON GEOCODEES

Il s'agit de faire le classement des lieux les plus accidentogènes avant et après géocodage, de les comparer et d'expliquer les différences en faisant ressortir la supériorité du géocodage.

3 RÉSULTATS

3.1 PRÉTRAITEMENTS

- Au départ, 19263 accidents recensés sur les dix (10) communes d'Abidjan sur les années 2016-2017-2018 ont été obtenus auprès de l'OSER sous forme de fichiers Excel sans coordonnées géographiques. Un travail de géocodage qui consiste à attribuer des coordonnées géographiques à ces accidents était à faire avant toute activité cartographique. Mais cette base de données multi sources comportait des doublons à apurer.
- L'apurement a donné 18699 accidents sur les dix (10) communes d'Abidjan sur les années 2016-2017-2018 après rejets doublons soit des moyennes de 6233 accidents par an dans la ville d'Abidjan et 1870 accidents par commune sur la somme des trois (03) ans. Cet apurement de doublons s'est fait à travers le menu « supprimer les doublons » intégré dans Excel combiné à un programme spécialement écrit sous Excel à cet effet dont l'algorithme a été décrit dans la méthode prétraitement. En dehors des doublons, il pouvait exister des enregistrements incomplets (accidents dont l'une des rubriques date, heure, lieu, circonstances, bilan manque). Ces enregistrements ont été recherchés et détectés par la technique des tris sous Excel.
- Ainsi, il est resté 18440 accidents sur les dix (10) communes d'Abidjan sur les années 2016-2017-2018 après rejets des enregistrements incomplets. A partir de là, la commune la plus accidentogène a été retenue et extraite pour l'étude. Il s'agit de la commune de Yopougon.
- Total Yopougon extrait de la base après rejet doublons et données incomplètes: 4480 accidents sur les trois ans; largement au-dessus de la moyenne communale de 1870. C'est donc la commune la plus accidentogène. Mais toutes ces données ne sont pas géocodables. En effet, certaines adresses sont restées très vagues. Exemple: lieu = château d'eau; lieu = marché. Or il y a plus d'un château d'eau et de marché dans la commune. Ces données ont été écartées. Elles sont au nombre de 23. Ce qui donne 4457 accidents géocodables soit un taux de géocodage de 99,5%.
- Total géocodables: 4457 accidents repartis sur 2912 adresses différentes.

L'objectif étant d'étudier *in fine* les accidents graves et afin de ne pas géocoder inutilement les accidents moins graves nous avons pratiqué un échantillonnage ciblé en retirant de la table, les accidents purement matériels (sans blessés) et les accidents avec un seul blessé léger, soit 1292. Cela fait un total restant de 3165 accidents à géocoder sur 2707 adresses nominales différentes comme illustré dans le tableau 4.

Tableau 4. Synthèse des prétraitements

CHAPITRE	ACTION	NOMBRE	ADRESSES NOMINALES CORRESPONDANTES
PRE-TRAITEMENTS	Accidents extraits de la base OSER sur les années 2016-2017-2018 au sein des 10 communes d'Abidjan	19263	
	Accidents retenus de la base OSER sur les années 2016-2017-2018 au sein des 10 communes d'Abidjan après apurement des doublons	18699	
	Accidents des 10 communes d'Abidjan retenus dans la base OSER sur ces années après rejet des enregistrements incomplets	18440	
	Accidents de Yopougon extraits de la base	4480	
	Accidents de Yopougon géocodables	4457	2912
DONNEES A GEOCODER	Accidents de Yopougon retenus pour géocodage	3165	2707

3.2 DONNÉES GÉOCODÉES

Le tableau 5 ci-dessous est un extrait de la base de données géocodées à défaut de pouvoir présenter ici les 3165 lignes.

Tableau 5. Extrait de la base de données des accidents géocodés

NUM ORDRE	DATE	HEURE	LIEU EXACT	CIRCONSTANCE	TU	BG	BL	LATITUDE	LONGITUDE	MOYEN
01	02/01/16	19:00	carrefour lubafrique	Défaut de maitrise	1	0	1	5,32992	-4,10416	Google map
02	30/06/17	06:40	face pharmacie Chigata	Imprudence du conducteur	1	0	1	5,32507	-4,06032	Google map
03	14/04/18	23:47	face Cosmos	Vitesse excessive	0	1	3	5,35024	-4,07336	Google Earth
04	23/09/16	10:00	carrefour ancien bel air	Défaut de maitrise	0	1	0	5,34663	-4,05942	Enquêtes terrains+ relevé GPS
05	26/05/17	19:35	route Dabou hauteur Bonikro	Vitesse excessive	0	1	0	5,34683	-4,10615	Enquêtes terrains+ relevé GPS
06	22/04/18	15:20	carrefour sapeurs pompiers	défaut de maîtrise	0	4	0	5,32855	-4,06096	Google map

Légende:

TU = nombre de personnes tuées dans l'accident

BG = nombre de personnes gravement blessées dans l'accident

BL = nombre de personnes légèrement blessées dans l'accident

Moyen = moyen d'acquisition des coordonnées géographiques

Nous avons 3165 lignes de constats d'accidents qui pourraient laisser penser qu'il y a eu 3165 lieux d'accidents. Mais dans la logique et de toute évidence, en trois années, des accidents ont pu se répéter en certains points. Également, il y a fort à penser comme énoncé dans la problématique que suivant l'agent de constat, le baptême (l'appellation) du point peut varier en fonction du repère environnant choisi. Il a donc fallu harmoniser la base. Les tableaux 6 à 9 de la section 3.1.3 ci-dessous illustrent les traitements effectués sur la base géocodée.

3.3 BASE DE DONNÉES GÉOCODÉE HARMONISÉE

Tableau 6. *Extrait de la base de données des accidents avec insertion de valeurs images des coordonnées géographiques*

NUM ORDRE	DATE	HEURE	LIEU EXACT	CIRCONSTANCE	LATITUDE	LONGITUDE	LATITUDE IMAGE	LONGITUDE IMAGE
01	02/01/16	19:00	carrefour lubafrique	Défaut de maitrise	5,32992	-4,10416	532992	410416
02	30/06/17	06 40	face pharmacie Chigata	Imprudence du conducteur	5,32507	-4,06032	532507	406032
03	14/04/18	23:47	face Cosmos	Vitesse excessive	5,35024	-4,07336	535024	407336
04	23/09/16	10:00	carrefour ancien bel air	Défaut de maitrise	5,34663	-4,05942	534663	405942
05	26/05/17	19:35	route Dabou hauteur Bonikro	Vitesse excessive	5,34683	-4,10615	534683	410615
06	22/05/18	15:20	carrefour sapeur pompiers	Défaut de maitrise	5,32855	-4,06096	532855	406096

Des valeurs images sont associées aux coordonnées géographiques respectives. Il s'agit de nombres entiers positifs. Dans le système de coordonnées géographiques WGS 84 à degrés décimaux, la commune de Yopougon est caractérisée par des latitudes positives et des longitudes négatives. Puisque les latitudes sont constituées de nombres décimaux positifs à cinq (5) chiffres après la virgule, pour obtenir leur image positive, elles ont été multipliées par (10.000). Quant aux longitudes, puisqu'elles sont constituées de nombres décimaux négatifs à cinq (5) chiffres après la virgule, pour obtenir leur image positive, elles ont été multipliées par (-10.000). Ensuite, un code unique est attribué à chaque point pour le distinguer des autres tant en latitude, en longitude qu'en appellation alphanumérique. Ce code est obtenu par concaténation des images des latitudes et des longitudes calculées précédemment. Le tableau 7 suivant en est une illustration.

Tableau 7. *Attribution de codes uniques aux points d'accidents par concaténation de coordonnées*

NUM ORDRE	DATE	LIEU EXACT	LATITUDE	LONGITUDE	LATITUDE IMAGE	LONGITUDE IMAGE	CONCATE-NATION LATITUDE- LONGITUDE IMAGES
01	02/01/16	carrefour lubafrique	5,32992	-4,10416	532992	410416	532992410416
02	30/06/17	face pharmacie Chigata	5,32507	-4,06032	532507	406032	532507406032
03	14/04/18	face Cosmos	5,35024	-4,07336	535024	407336	535024407336
04	23/09/16	carrefour ancien bel air	5,34663	-4,05942	534663	405942	534663405942
05	26/05/17	route Dabou hauteur Bonikro	5,34683	-4,10615	534683	410615	534683410615
06	22/04/18	carrefour sapeurs pompiers	5,32855	-4,06096	532855	406096	532855406096

Les coordonnées ainsi concaténées, chaque lieu d'accident peut comporter des appellations différentes, mais dispose d'un numéro matricule unique qui permet d'établir une équivalence entre toutes les appellations qui portent le même numéro. Pour cela, la base est réorganisée par ordre croissant des coordonnées concaténées en vue de regrouper tous les noms de lieux qui ont le même matricule. Le tableau 8 suivant en est une illustration.

Tableau 8. Classification des lignes de la base de données géographique par ordre de code concaténés

NUM	DATE	LIEUX HETEROCLITES	LATITUDE	LONGITUDE	CONCATENATION LATITUDE-LONGITUDE
1.	17/01/2016	hauteur sapeurs pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
2.	01/12/2016	carrefour sapeur pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
3.	11/03/2017	carrefour gspm	5,32855	-4,06096	532855406096
4.	28/08/2017	hauteur gspm	5,32855	-4,06096	532855406096
5.	14/02/2018	carrefoure sapeurs pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
6.	02/04/2018	face sapeurs pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
7.	13/06/2018	feu sapeur pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
8.	20/06/2018	peu avant feu sapeurs pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
9.	01/11/2018	peu apres carrefour sapeur pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
10.	02/12/2018	face sapeurs pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
11.	12/04/2017	carrefour sapeurs pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
12.	19/04/2017	carrefour sapeurs pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
13.	06/08/2017	yopougon hauteur gspm	5,32855	-4,06096	532855406096
14.	08/11/2017	face sapeurs pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
15.	09/12/2017	carrefour sapeur pompier	5,32855	-4,06096	532855406096
16.	11/02/2018	caserne gspm	5,32855	-4,06096	532855406096
17.	11/03/2018	peu avantcarrefourgspm	5,32855	-4,06096	532855406096
18.	19/03/2018	peu apres les sapeurs pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
19.	03/04/2018	face station shell vers sapeurs pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
20.	03/12/2018	face station shell vers sapeurs pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
21.	20/03/2016	apres carrefoure sapeur pompier	5,32855	-4,06096	532855406096
22.	11/02/2016	carrefour sapeurs pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
23.	11/05/2016	carrefour sapeurs pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
24.	11/06/2016	carrefour sapeurs pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
25.	09/10/2016	carrefour sapeurs pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
26.	11/09/2017	carrefour sapeurs pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
27.	13/01/2018	feu sapeur pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
28.	25/04/2018	route bel air vers sapeurs pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
29.	25/12/2018	route bel air vers sapeurs pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
30.	20/07/2018	carrefour sapeur pompier	5,32855	-4,06096	532855406096
31.	13/01/2016	hauteur sapeurs	5,32855	-4,06096	532855406096
32.	03/06/2018	carrefour sapeurs pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
33.	22/04/2018	carrefour sapeurs pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
34.	22/12/2018	carrefoure sapeurs pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096
35.	01/08/2017	hauteur gspm	5,32855	-4,06096	532855406096
36.	20/12/2016	hauteur sapeurs pompiers	5,32855	-4,06096	532855406096

Comme on le voit, le point de coordonnées (5,32855; -4,06096) avec pour matricule (532855406096) comporte trente-six (36) appellations différentes selon la succession des agents de constats qui combinent les mots clés: Yopougon, gspm, sapeur-pompier, carrefour, feux, caserne. Pour une base de données classique (sans coordonnées géographiques), il s'agit de trente-six (36) points différents. Mais par l'intermédiaire du géocodage, le problème de l'équivalence cachée peut être réglé. Nous le faisons en rebaptisant chaque code unique par un nom choisi parmi les divers noms déjà attribués au point concerné par les agents de constat. A l'aide d'un tableur (Excel notamment), cela se fait en une seule opération et l'on a le tableau 9 ci-dessous.

Tableau 9. Lieux d'accidents harmonisés

	DATE	HEURE	LATI-TUDE	LONGI-TUDE	CIRCONSTANCES	LIEUX HARMONISES
1.	17/01/2016	10:00:00	5,32855	-4,06096	non respect règles de priorités	carrefour sapeurs pompiers
2.	01/12/2016	06:00:00	5,32855	-4,06096	non respect règles de priorités	carrefour sapeurs pompiers
3.	11/03/2017	10:00:00	5,32855	-4,06096	imprudence du conducteur	carrefour sapeurs pompiers
4.	28/08/2017	21:40:00	5,32855	-4,06096	défaut de maîtrise	carrefour sapeurs pompiers
5.	14/02/2018	22:30:00	5,32855	-4,06096	défaut de maîtrise	carrefour sapeurs pompiers
6.	02/04/2018	16:00:00	5,32855	-4,06096	stationnement dangereux	carrefour sapeurs pompiers
7.	13/06/2018	10:00:00	5,32855	-4,06096	défaut de maîtrise	carrefour sapeurs pompiers
8.	20/06/2018	13:00:00	5,32855	-4,06096	défaut de maîtrise	carrefour sapeurs pompiers
9.	01/11/2018	06:00:00	5,32855	-4,06096	défaut de maîtrise	carrefour sapeurs pompiers
10.	02/12/2018	16:00:00	5,32855	-4,06096	défaut de maîtrise	carrefour sapeurs pompiers
11.	12/04/2017	21:20:00	5,32855	-4,06096	défaut de maîtrise	carrefour sapeurs pompiers
12.	19/04/2017	07:50:00	5,32855	-4,06096	imprudence du conducteur	carrefour sapeurs pompiers
13.	06/08/2017	14:00:00	5,32855	-4,06096	non respect règles de priorités	carrefour sapeurs pompiers
14.	08/11/2017	16:10:00	5,32855	-4,06096	non respect règles de priorités	carrefour sapeurs pompiers
15.	09/12/2017	19:30:00	5,32855	-4,06096	imprudence du conducteur	carrefour sapeurs pompiers
16.	11/02/2018	05:05:00	5,32855	-4,06096	défaut de maîtrise	carrefour sapeurs pompiers
17.	11/03/2018	01:30:00	5,32855	-4,06096	défaut de maîtrise	carrefour sapeurs pompiers
18.	19/03/2018	09:00:00	5,32855	-4,06096	stationnement dangereux	carrefour sapeurs pompiers
19.	03/04/2018	10:00:00	5,32855	-4,06096	défaut de maîtrise	carrefour sapeurs pompiers
20.	03/12/2018	10:00:00	5,32855	-4,06096	défaut de maîtrise	carrefour sapeurs pompiers
21.	20/03/2016	22:00:00	5,32855	-4,06096	défaut de maîtrise	carrefour sapeurs pompiers
22.	11/02/2016	11:40:00	5,32855	-4,06096	défaut de maîtrise	carrefour sapeurs pompiers
23.	11/05/2016	11:40:00	5,32855	-4,06096	défaut de maîtrise	carrefour sapeurs pompiers
24.	11/06/2016	11:40:00	5,32855	-4,06096	imprudence du conducteur	carrefour sapeurs pompiers
25.	09/10/2016	11:40:00	5,32855	-4,06096	non respect règles de priorités	carrefour sapeurs pompiers
26.	11/09/2017	11:40:00	5,32855	-4,06096	non respect règles de priorités	carrefour sapeurs pompiers
27.	13/01/2018	21:30:00	5,32855	-4,06096	imprudence du conducteur	carrefour sapeurs pompiers
28.	25/04/2018	17:30:00	5,32855	-4,06096	défaut de maîtrise	carrefour sapeurs pompiers
29.	25/12/2018	17:30:00	5,32855	-4,06096	défaut de maîtrise	carrefour sapeurs pompiers
30.	20/07/2018	11:30:00	5,32855	-4,06096	stationnement dangereux	carrefour sapeurs pompiers
31.	13/01/2016	22:30:00	5,32855	-4,06096	défaut de maîtrise	carrefour sapeurs pompiers
32.	03/06/2018	22:00:00	5,32855	-4,06096	défaut de maîtrise	carrefour sapeurs pompiers
33.	22/04/2018	15:20:00	5,32855	-4,06096	défaut de maîtrise	carrefour sapeurs pompiers
34.	22/12/2018	15:20:00	5,32855	-4,06096	défaut de maîtrise	carrefour sapeurs pompiers
35.	01/08/2017	22:50:00	5,32855	-4,06096	défaut de maîtrise	carrefour sapeurs pompiers
36.	20/12/2016	11:45:00	5,32855	-4,06096	imprudence du conducteur	carrefour sapeurs pompiers

Les trente-six (36) noms de baptêmes ont été remplacés par un seul à savoir « Yopougon carrefour sapeurs-pompiers ».

Ce processus d'harmonisation et de regroupement d'adresses nominales des 3165 accidents a permis de passer de 2707 adresses différentes à 280 sur la base de la manipulation des coordonnées géographiques. Sur ces données statistiques, nous avons 1694 accidents graves c'est-à-dire des accidents avec au moins un blessé grave ou un tué. Ces accidents se répartissent sur 1138 adresses nominales différentes avant le traitement (manipulation) par coordonnées géographiques et sur 251 adresses nominales après.

3.4 COMPARAISON DES DONNEES DES BASES NON GEOCODEES ET GEOCODEES

Cette section de résultats a pour but de montrer la plus-value apportée par le géocodage sur les données statistiques de bases des accidents de la circulation. Pour se faire, nous présenterons respectivement dans les tableaux 10, 11 et 12, l'état des données statistiques avant et après géocodage, les classements des lieux d'accidents en termes de gravité avant géocodage et après géocodage.

Tableau 10. *Etat des données statistiques avant et après harmonisation par géocodage*

	Nombre	Nombre d'adresses correspondantes avant harmonisation par géocodage	Nombre d'adresses correspondantes après harmonisation par géocodage	Taux d'agrégation
Échantillon d'accidents	3165	2707	280	90%
Accidents graves	1694	1138	251	80%

Le tableau nous montre sur ses deux lignes, une réduction du nombre de lieux d'accidents de 80 à 90% après l'harmonisation par géocodage. En effet, l'harmonisation par géocodage a permis le regroupement de lieux aux coordonnées identiques mais d'appellations ou références différentes qui donnaient l'impression d'un nombre pléthorique de lieux.

Le tableau 11 montre qu'avant l'harmonisation par géocodage, les trois lieux les plus accidentogènes sont dans l'ordre: Koweit, Andokoi, Keneya avec des scores respectifs de 20, 15, 13 accidents sur les trois années. Après l'harmonisation par géocodage, le classement devient dans l'ordre: Siporex, Carrefour sable et Keneya avec des scores respectifs de 61, 59, 55 accidents sur les trois années (voir tableau 12). Siporex et Carrefour sable apparaissent dans le trio fortement accidentogène avec des scores renforcés de 61 et 59 en remplacement de Koweit et Andokoi. Keneya reste en position 3 mais voit également son score renforcé en passant de 13 à 55. Ces changements de classements sont dus au fait qu'avant géocodage, leurs scores étaient éclatés sous différentes appellations et il était quasi impossible de s'en apercevoir.

Tableau 11. *Classement des lieux les plus accidentogènes avant géocodage*

Classement	FREQUENCE	Lieu
1	20	Koweit
2	15	Andokoi
3	13	Hauteur kenya
4	12	Banco 2
5	11	Sicogi
6	10	Hauteur ghandi
7	9	Route abobo d'oumé
7 ex	9	Route Dabou
7 ex	9	Siporex
7 ex	9	Axe adjamé-yopougon
11	8	Carrefour sable
11 ex	8	carrefour BEL AIR
11 ex	8	Hauteur poste siporex
11 ex	8	Hauteur BAE
11 ex	8	Hauteur SIPOREX

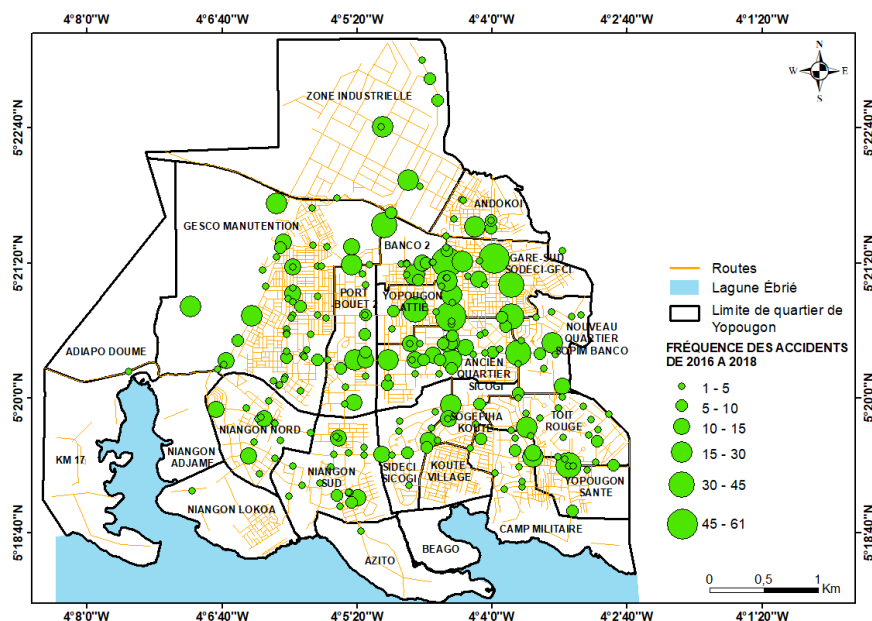


Fig. 4. Carte du cumul des accidents

4 DISCUSSION

La méthode adoptée a permis de géocoder les 1694 accidents graves retenus à cet effet et de passer de 1138 lieux à 251 pour le même nombre de sinistres, regroupant ainsi les lieux identiques nommés différemment. Ce résultat confirme ainsi l'hypothèse de départ selon laquelle la solution de localisation des accidents par géocodage permet de réorganiser et d'apporter une plus-value aux données d'accidents de base en les rendant plus cohérentes puisque de nombreux points d'accidents qui paraissent distincts de par leurs noms ou leurs points référents peuvent être en réalité des « homonymes-géographiques » et donc être agrégés pour effectuer des statistiques plus proches de la réalité. Le corolaire de cette plus-value partant de cette agrégation est un meilleur reclassement des lieux accidentogènes et la révélation de leur agencement par cartographie.

Cette méthode de géocodage qui utilise les moyens modernes GNSS et SIG avec enregistrement à posteriori dans les bases de données requiert pour être efficace, des relevés *in situ* corrects et également des reports ultérieurs sans erreurs. L'intervention humaine y est encore importante avec son lot probable d'erreurs à chaque étape. Mais elle a l'avantage de tenir compte des réalités des pays sous-développés. En effet, dans la ville de Ouagadougou au Burkina-faso, Nikiema *et al.* ont expérimenté le transfert de coordonnées *in situ* à l'aide de géotraceurs (récepteurs GPS munis de puces téléphoniques connectées au réseau GSM) [14]. Sur 2736 accidents constatés, seulement 872 ont vus leurs coordonnées transférées à travers ce réseau soit à peine 32% des sinistres. Le reste n'a pu l'être pour raison de dysfonctionnements liés à la chaleur et à la qualité du réseau téléphonique qui ont perturbé la collecte [15]. A Bamako au Mali [16], la Banque Africaine de Développement a réalisé, une étude avec les mêmes méthodes de collectes et de cartographies des accidents que celles employées par Nikiema *et al* [14]. Ici, contrairement à Ouagadougou, les interruptions de transferts de coordonnées géographiques dues aux disfonctionnements de réseau n'ont pas été signalées. Par contre, il est souvent arrivé que les populations témoins des accidents s'opposent au transfert numérique des données parce que percevant l'utilisation des smartphones par les unités de secours comme outils de photographie et de vidéo qui violent la dignité et l'intimité des victimes plutôt qu'outil de renseignement de fiche d'accident. Ainsi, à Ouagadougou comme à Bamako, le transfert en temps réel de données sur les accidents de la route par réseau GSM est problématique; le premier cas pour des lacunes dans la disponibilité du réseau, le deuxième pour une incompatibilité de la méthode avec les mœurs locales. La méthode de l'actuelle étude se présente donc comme une bonne alternative pour les pays de l'Afrique subsaharienne.

Mais le regroupement des lieux accidentogènes, basé essentiellement sur la concaténation des coordonnées géographiques s'applique seulement aux points ayant des coordonnées identiques même si leurs appellations sont différentes. Il suffit que les coordonnées soient différentes avec même de petits écarts qui pourraient autoriser des regroupements que cette méthode ne soit plus adaptée pour des agrégations. A titre d'exemple, les points A (latitude = 5,35573; longitudes = -4,07411) et B (latitude = 5,35574; longitudes = -4,07412) sont à peine séparés à chaque fois que d'une seule unité, ils sont donc

assez proches et agréables, mais les concaténations de leurs coordonnées donnent respectivement 535573407411 et 535574407412 ce qui correspond à deux nombres totalement différents d'écarts 1000001. L'algorithme de la cartographie par densité de noyau pourrait permettre de résoudre ces cas de figures en définissant l'intervalle de fenêtre de regroupement. Cet algorithme étant insensible aux cas traités par la concaténation des coordonnées, ces deux méthodes pourraient être complémentaires.

Sur 4480 accidents de la circulation recensés, 4457 étaient géocodables par l'actuelle méthode proposée soit un taux de géocodage de 99,5%. Ce potentiel est proche de ceux de Kim *et al.* [17] et Steiner *et al.* [18] qui ont géocodé les accidents de la route à partir d'adresses nominales comme dans notre cas à la différence qu'ils ont bénéficié d'un environnement d'adressage formelles (condition essentielle pour l'exploitation de leur application). Kim *et al.* [17] ont développé un logiciel propre à eux et l'appliquant à Oahu en Hawaï, ont pu géocoder 98% des accidents. Quant à Steiner *et al.* [18] de l'université de Floride, faisant plus simple en développant sous Arcgis une application personnalisée de géocodage des accidents de la circulation, ils ont atteint un taux similaire de géocodage de 97,9%. Les trois taux sont assez proches mais notre étude a l'avantage de s'adapter aux contextes d'adressages non formels et de surcroît de sonder et de se prononcer sur le taux d'agrégation des données avant et après géocodage qui varie ici de 80 à 90%.

Par ailleurs, nos résultats font état d'environ 45% de collisions aux intersections, valeur proche de celle de Kim *et al.* qui avancent environ 43 % de toutes les collisions aux intersections.

5 CONCLUSIONS

La méthode de géocodage adoptée a permis d'attribuer des coordonnées géographiques à 99,5% de l'échantillon des accidents graves dont 45% se sont produits à des intersections. La concaténation des coordonnées géographiques, spécifiquement des latitudes et longitudes après le géocodage des accidents a permis d'agréger avec un taux de 80 à 90%, les sinistres qui se sont déroulés sur le même point mais qui étaient éclatés sous différentes appellations. Pour atteindre ces taux, les relevés in situ et les reports doivent se faire avec le moins d'erreurs possibles. Aussi, la méthode de concaténation ne fonctionne qu'avec les coordonnées géographiques identiques sans légers décalages. Cette limite peut être compensée par la cartographie par densité de noyau qui lui est complémentaire.

En vue de valoriser le géocodage et l'harmonisation des points d'accidents de la route, il est souhaitable que pour tout constat, les agents relèvent les coordonnées géographiques des lieux. Afin de rendre cette approche accessible aux états de l'Afrique sub-saharienne, ces coordonnées pourront être relevées par les smartphones personnels des agents et consolidées sous google Maps et google Earth; évitant ainsi d'imposer aux départements concernés, la crainte de lourds investissements en achats de terminaux qui sont habituellement les causes de rejets des projets novateurs. Par ailleurs, les états de la sous-région qui ont expérimenté la transmission en temps réel des coordonnées géographiques par réseau GSM se sont heurtés soit à la non disponibilité du réseau par moments soit à l'incompréhension des populations.

Généralement, quatre types d'acteurs interviennent dans les statistiques d'accidents: les agents de constats (gendarmerie, police), les services de secours (pompiers, médecins), les assureurs et les organes étatiques de sécurités routières. Afin qu'ils aient les mêmes références pour statuer et échanger les données sur un sinistre donné, nous proposons l'adoption d'un numéro d'identification unique pour chaque accident utilisable par tous les acteurs. Ce numéro pourrait être de la forme: date-heure-coordonnées géographiques des lieux-unité de constat. A partir de ce numéro, les acteurs du domaine des statistiques accidentologiques pourront se connecter en ligne pour renseigner et consulter chacun en ce qui le concerne, les retours géostatistiques des accidents de la circulation routière. Dans l'application, on peut attribuer le numéro 29.02.2024.17.30+5,34678-4,07336.16Arrd pour un accident qui a eu lieu le 29 février 2024 à 17 heures 30 mn au point de coordonnées géographiques latitude +5,34678 et longitude -4,07336 (relevées par GPS), constaté par le commissariat du 16^{ième} arrondissement. Il s'agit ici du carrefour SIPOREX.

REFERENCES

- [1] Snow, On the Mode of Communication of Cholera, 2nd ed., London: John Churchill, 162 p., 1855.
- [2] M.H. Vandersmissen et al., Mortalité et Morbidité dues aux accidents de la route: Essai de comparaison Belgique-Quebec, 18 p., 1996.
- [3] H. Moellering, The journey of death: A spatial analysis of fatal traffic crashes in Michigan 1969, University of Michigan, Department of Geography, Ph.D. Thesis, 184 p., 1973.
- [4] R. Pampalon, Géographie de la mortalité sur les routes du Québec, Routes et transports, 32, PP 18-21, 1982.

- [5] S. Labonté, Expérimentation du système de positionnement global (GPS) pour la localisation des accidents de la route en Montérégie, Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Se.) en géographie, cheminement géomatique, Département de géographie et télédétection Faculté des lettres et sciences humaines Université de Sherbrooke, 94 p., 2004.
- [6] R.C. Smith, D.L. Harkey, and B. Marris, Implementation of GIS-Based Highway Safety Analyses: Bridging the Gap, FHWA-RD-01-039, University of North Carolina, Chapel Hill, 44 p., 2001.
- [7] F. Huguenin-Richard, Cartographie des accidents de la circulation. Researchgate. 21p., 2010 disponible auprès de <https://www.researchgate.net/publication/316988781>.
- [8] S. Mansouri, J-Y Fournier, Localisation des accidents par coordonnées GPS dans le fichier national des accidents de la circulation: un état de la situation., Carnets d'accidentologie. Vol. 2018, p. 13-23, 2018.
- [9] K. Kim, N. Levine, and L. Nitz, Development of a Prototype Traffic Safety Géographie Information System, Transportation Research Record 1477, Transportation Research Board, Washington, D.C., p. 41-47., 1995.
- [10] Edenmap, 2023. [En ligne] Disponible: <https://edenmap.com/les-adresses-geocodees-en-afrique/> (11 Janvier 2025).
- [11] Ecobuilder, 2023. [En ligne] Disponible <https://www.ecobuilder.fr/2023/12/02/le-probleme-dadressage-des-villes-africaines/> (11 Janvier 2025).
- [12] Wanguép [En ligne] Disponible <https://fr.linkedin.com/pulse/le-manque-dadressage-en-afrique-parle-brandon-brice-wanguép-nguebou> (11 Janvier 2025).
- [13] Organisation Mondiale de la Santé (OMS). La sécurité routière dans la région africaine, 23 p. 2015.
- [14] A. Nikiema, E. Bonnet, S. Sidbega, V. Ridde, Les accidents de la route à Ouagadougou, un révélateur de la gestion urbaine, Lien social et Politiques. Volume 78, pp 89–111., 2017.
- [15] E. Bonnet, A. Nikiema, S. Sidbega et V. Ridde, « Technological Solutions for an Effective Health Surveillance System for Road Traffic Crashes in Burkina Faso », Global health action, vol. 10. 10 p., 2017.
- [16] Banque africaine de développement, Département Infrastructure et développement urbain, Étude pour l'amélioration de la sécurité routière dans le District de Bamako, 139 p., 2018.
- [17] K. Kim, N. Levine and L. Nitz, Development of a Prototype Traffic Safety Geographic Information System, Transportation research record number 1477. Pp 41-47, 1995.
- [18] R. Steiner, I. Bejleri, X. Yang, D.-H. Kim, Improving geocoding of traffic crashes using a custom ArcGIS address matching application. 2003, 13 p. [En ligne] Disponible <https://www.researchgate.net/publication/237771508> (01 février 2025).

Agronomic performances of plantain (*Musa paradisiaca*, AAB, Corne 1) vivo-plants produced on a substrate treated with NaCl solutions and *Sargassum natans* extracts

Brahima Djaratche¹, Seu Jonathan Gogbeu¹, Koffi Jean Baptiste Djiwonou², and Koutoua Ayolie¹

¹Laboratory of Improvement of Agricultural Production, University Jean Lorougnon Guédé, Box 150 Daloa, Côte d'Ivoire

²Department of Environmental Sciences, University of Bondoukou, Box V 81 Bondoukou, Côte d'Ivoire

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

ABSTRACT: In Côte d'Ivoire, plantain is a widely consumed food. It's grown in all humid agroecological areas of the country. Despite its adaptation to these areas, plantain production remains insufficient on the coast of cultivation soils salinization. This study aimed to improve plantain production in coastal area of Côte d'Ivoire by obtaining vivo-plants. It was conducted to evaluate agronomic performance of plantain vivo-plants from environments treated with increasing solutions of NaCl (0, 5, 10 and 15 g/l) and *Sargassum natans* (25, 50 and 100%). Two-month-old plants were transferred to plots developed in Azaguié locality and some production and yield parameters were evaluated. Results showed that time interval between planting and flowering and production cycle were short in plants from environments treated with *S.natans* (50 and 100%) and NaCl (5 and 10g/L) solutions. Average mass of bunches and middle finger varied according to plants from different treatments. However, the best yields were obtained with T 50% concentration of *S. natans* extract (18.33 t/ha) and 5g/L of NaCl solution (16.32 t/ha) compared to control (14.35 t/ha). In conclusion, concentrations of 5 g/L of NaCl solution and T 50% of *S. natans* extract can be used to evaluate tolerance of plantains to soil salinity to improve yield.

KEYWORDS: *Musa paradisiaca*, NaCl, *Sargassum natans*, agronomic parameters.

1 INTRODUCTION

Plantain (*Musa paradisiaca* L.) is a monocotyledonous plant belonging to Musaceae family. It is cultivated in many regions of world, mainly in Latin America and Africa where it's a staple food for populations [1]. In sub-saharan Africa, it ensures food security and contributes to fight against poverty by improving producers' income [2]. In Côte d'Ivoire, it's the third most important food crop after yam and cassava [3]. Annual production of plantain, estimated at more than 1.7 million tonnes, remains insufficient to meet food needs of a rapidly growing population [4]. Like all plants, plantain cultivation in Côte d'Ivoire is faced with several environmental factors limiting its production, including disease and pest attacks as well as soil salinization in coastal area [5]. To overcome difficulty of producing plants in salinity environment, several scientific approaches are being considered, such as selection of tolerant varieties, genetic mutation and stimulation of natural defense plant using biotic and abiotic elicitors. Previous work carried out by some researchers on rice [6] and banana [7] has shown that NaCl could be used as a marker of plant resistance to soil salinity. [8] also showed that liquid extract from *Sargassum natans* would increase tolerance of plants to salinity stress. Objective of this study is to evaluate agronomic performances of plantain vivo-plants from media treated with NaCl and *S. natans*.

2 MATERIAL AND METHODS

2.1 MATERIAL

2.1.1 PLANT MATERIAL

Plant material consists of two-month-old plantain (*Musa paradisiaca* AAB Corne 1) vivo- plants (**Fig. 1**) from stem fragment plant multiplication technique. This cultivar represents more than 80% of national plantain production in Côte d'Ivoire and is grown in almost all humid pedoclimatic zones of country [9].



Fig. 1. plantain vivo-plants used

2.1.2 PRESENTATION OF STUDY AREA

Study was conducted in Azaguié (5°18' North latitude and 4°09' West longitude) located 20 km from Abidjan city, Côte d'Ivoire (Fig.2). This area is characterized by a hot and humid environment with four seasons including two rainy seasons and two dry seasons. Longest rainy season lasts five months. Average annual rainfall is 1200 mm with a temperature varying between 23 and 28°C [10].

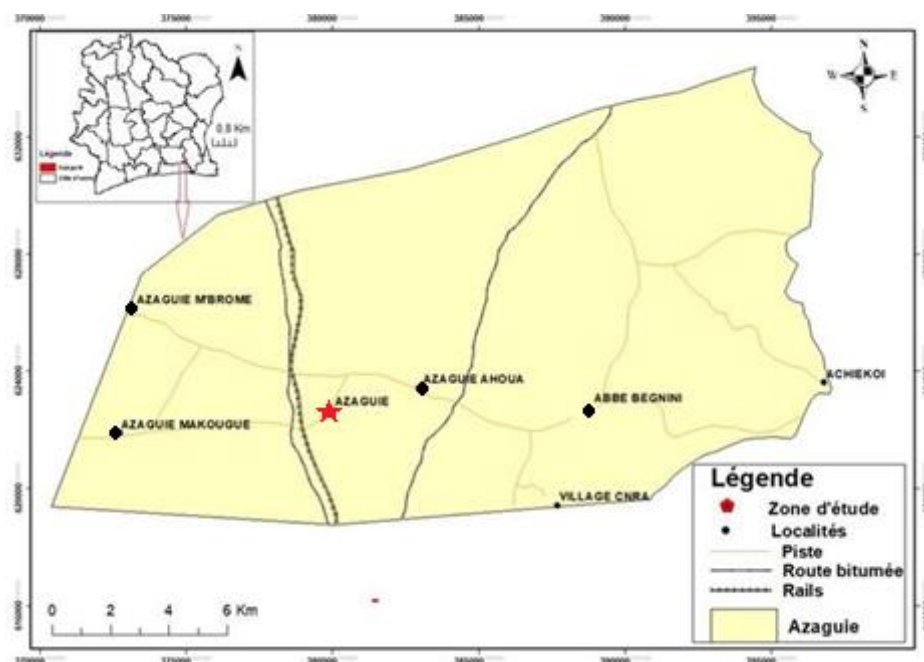


Fig. 2. Map of study site in Azaguié

2.2 METHODS

2.2.1 PREPARATION OF ELICITOR SOLUTIONS

Sodium chloride (NaCl) solutions were prepared according to [11] method. A mass of 5, 10, 15, 20 and 30 g/L of NaCl was dissolved respectively in 1 L of tap water. As for *Sargassum natans* solution, modified method of [12] was used. Harvested algae were rinsed thoroughly with tap water to remove sand and sea salt. They were then sorted to remove impurities. Clean algae were dried for 72 hours at 37 °C in an oven and then crushed using a GRT-By600 electric grinder. To make algae extract, 200 g of algae powder were soaked in 2 L of tap water. This mixture was placed in a water bath at 40 °C for 30 minutes. After cooling, solution was filtered using a 5 µm mesh

sieve. This algae extract obtained constituted mother solution (100 %) from which concentrations of 25 and 50% were obtained. Different solutions were stored in Erlenmeyer flasks at 37°C before use.

2.2.2 PLANT PRODUCTION

Vivo-plants from stem fragment plant multiplication technique was used to produce plants. Explants prepared and dried using this technique were inoculated into pots containing disinfected sawdust. Pots were watered with different solutions of NaCl (0, 5, 10 and 15 g/L) and *Sargassum natans* (25, 50 and 100%), at a rate of 500 mL of solutions (NaCl or *S. natans*) every three days. After four weeks of cultivation, leafy rejects were collected and transplanted into 12 cm x 16 cm polyethylene bags, filled with a mixture of potting soil and sand treated with fungicide. Bags were placed under a shade in batches of 50 plants in a completely random arrangement. After two months, vigorous plants were selected and transferred to field.

2.2.3 EXPERIMENTAL DESIGN AND MAINTENANCE OF PLANTS IN FIELD

Study was carried out in an experimental field of 500 m² previously left fallow. Plants were planted according to a completely randomized Fisher block design with three repetitions. Vivo-plants from environments treated with NaCl solutions (0; 5; 10; 15g/l) and *Sargassum natans* extracts (25, 50 and 100%) were used. Thirty (30) individuals per type of plant were planted with a spacing of 2.5 m between plants and 2.5 m between rows giving a classic density of 1500 plants/ha. Manual weeding with a machete and removal of dry leaves were regularly carried out. At flowering and harvest, agromorphological characterization of banana plants was carried out using observation using descriptor proposed by [13] (Table 1).

Table 1. Estimate method of plantain parameters at flowering and harvest

Parameters	Assessment method
Planting- flowering Interval time (j)	Planting-flowering interval time is the number of days elapsed between planting of vivo-plants and beginning of inflorescence. Average planting-flowering interval time (PFT) was calculated according to following formula: $PFT = \sum(\text{Planting-flowering duration})/NP$ NP: total number of plants
Plant height (cm)	Plant height was measured from pseudo stem base to plant top at level of the "V" formed by the last two functional leaves using a tape measure. Average height of plant (HiP) was calculated using following formula: $HiP = \sum(hi)/NP$ HiP = Average height of plant, hi = height of a plant; NP = total number of plants
Circumference of pseudo-stem (cm)	Pseudo stem circumference was measured from 10 cm from ground level. Average pseudo stem circumference (C) was calculated using the following formula: $C = \sum(Cp)/NP$ C = average circumference of pseudo stem; Ci = circumference of each plant at flowering; NP = total number of plants
Number of green leaves at flowering	Number of green leaves was counted at time of inflorescence emergence. Average number of green leaves (GL) at inflorescence was calculated using following formula: $GL = \sum(gi)/NP$ GL = Average number of green leaves at flowering; gi = number of green leaves of each plant at flowering; NP = total number of plants
Number of rejects at flowering	Number of rejects emitted by each plant was counted at flowering. Average number of rejects (NR) was calculated as follows: $NR = \sum(nri)/NPi$ NR = average number of rejects; nri = number of rejects per main plant at flowering; NPi = total number of main plants
Height of successor reject at harvest (cm)	Height of successor reject is measured at harvest using a tape measure. Average height of successor reject (HRS) was estimated using following formula: $HRS = \sum(hsr)/NS$ HRS = average successor reject height; hsr = height of a successor reject; NS = total number of successors rejects
Planting-harvest interval time (j)	Planting-harvest interval time is the number of days between planting and appearance of a physiologically mature finger on bunches. Mean planting-harvest interval time (PHT) was calculated using following formula:

	$PHT = \sum(\text{Planting-harvest duration})/NP$ NP: total number of plants
Mass of bunches (kg)	Mass of bunches is obtained using a kitchen balance and average mass (MH) is calculated according to following formula: $MH = \sum(m)/N$ MH = average mass; M = mass of each bunch; N = total number of bunches
Number of bunches hands	Number of bunches hands is manually evaluated. Average number of hands (NH) is calculated using following formula: $NH = \sum(nh)/N$ NH = average number of hands, nh: number of hands per bunches, N: total number of bunches
Number of fingers	Number of fingers carried by bunches is manually evaluated. Average number of fingers per bunches (NF) is evaluated according to following formula: $NF = \sum(nf)/N$ NF=average number of fingers, nf: number of fingers per diet, N: total number of bunches
Middle finger mass (g)	Mass of median finger of second hand was obtained by weighing using a precision balance. Average mass of median finger (MM) was calculated according to formula below. $MM = \sum(\text{mass of a median finger})/N$ MM: average mass of median fingers; N: total number of bunches
Middle finger length (cm)	Length of middle finger located on second hand of bunches was measured using a graduated ruler. Average finger length (FL) was calculated according to formula below: $FL = \sum(L)/N$ FL= average median finger length, L: length of each median finger, N: total number of bunches
Estimated yield (t/ha)	At harvest, yield was determined by sum of masses of banana bunches number collected on plot area, expressed in kg/m², then converted into t/ha. Average yield (Y) was calculated using formula opposite: $Y = \sum(\text{bunches mass}) / N$ Y: average yield. N: total number of banana bunches harvested on plot

2.3 STATISTICAL ANALYSIS

All data were subjected to a one-way or two-way analysis of variance (ANOVA) using Statistica software, version 7 at 5 % threshold. When $p < 0.05$, difference is considered significant and a post-ANOVA test, Newman-Keuls test is performed to identify homogeneous groups.

3 RESULTS

3.1 EFFECT OF NaCl SOLUTIONS AND SARGASSUM NATANS EXTRACTS ON PLANT HEIGHT, PSEUDO STEM CIRCUMFERENCE, INFLORESCENCE EMISSION TIME AND NUMBER OF GREEN LEAVES AT FLOWERING

Table 2 presents values of plant height, pseudo stem circumference, number of green leaves at flowering and planting-flowering interval time. At flowering, all these parameters indicated varied according to treatments except planting-flowering interval time ($p = 0.24$). Average height of pseudo stems from *Sargassum natans* environment was greater (321.66 cm), followed by NaCl treatments (283.33 cm) and control (292.33 cm). Concerning circumference of pseudo stems, plants from sargassum-treated environments recorded largest values (63.66 cm) while T10g/L and T15g/L treatments recorded smallest circumferences (56.00 cm). Similarly, number of green leaves brought to flowering was much greater for high concentrations of *S. natans* extract (11 leaves) and NaCl T5g/L solution (10.3 leaves).

Table 2. Agromorphological parameters at flowering of plantain plants

Elicitor	Treatments	Growth parameters			
		Planting- Flowering Interval (J)	Average plant height (cm)	Average circumference of pseudo-stem (cm)	Number of green leaves at flowering
Control	water	270.00±5.00 ^a	292.33±1.52 ^c	63.33±1.52 ^a	9.66±0.57 ^{ab}
	T5g/l	280.33±5.50 ^a	283.33±2.88 ^a	61.00±1.73 ^{ab}	10.3±0.57 ^{ab}
NaCl	T10g/l	281.00±12.1 ^a	280.00±1.00 ^a	58.33±1.52 ^b	8.66±0.57 ^a
	T15g/l	278.00±18.2 ^a	280.33±0.57 ^a	56.00±1.00 ^c	9.00±0.00 ^a
Sargassum natans	T25%	268.33±6.65 ^a	302.33±2.51 ^b	62.33±2.08 ^a	9.66±0.57 ^{ab}
	T50%	265.66±3.78 ^a	323.33±5.03 ^b	63.00±1.00 ^a	11.0±1.00 ^b
	T100%	267.66±2.51 ^a	321.66±3.78 ^b	63.66±2.08 ^a	11.0±1.00 ^b
<i>p</i>		0.25	0.001	0.001	0.004

In same column, numbers followed by same alphabetical letter are statistically identical at 5% threshold according to Newman-Keuls test.

3.2 EFFECT OF NaCl SOLUTIONS AND SARGASSUM NATANS EXTRACTS ON NUMBER OF REJECTS EMITTED, HEIGHT OF SUCCESSORS REJECTS AND HARVEST TIME

Table 3 presents data on number of days elapsed between planting-harvest, average number of successors rejects per plant and average height of main successor reject. Time between planting and harvest date is not influenced by origin of vivo-plants ($p = 0.39$). This time varied from 343 days to approximately 360 days. As for number of successors rejects, it was high in plants from environments treated with *Sargassum natans* extracts. Values varied from 9 to 10.3 leaves. Average height of main successor was high in plants from both NaCl and sargassum media. However, highest value was recorded in plants from sargassum T100% media (111 cm).

Table 3. Evaluation of harvest time, number of successor rejects emitted and height of main successor reject

Elicitor	Treatment	Growth parameters		
		Planting-harvest interval (j)	Average number of successors rejects per plant	Average height of main successor rejects (cm)
Control	water	349.33±4.04 ^a	6.33±0.57 ^a	93.33±6.50 ^{ab}
	T5g/l	350.00±5.00 ^a	5.33±0.57 ^a	92.00±10.5 ^{ab}
NaCl	T10g/l	357.00±24.0 ^a	5.66±1.52 ^a	88.66±8.08 ^a
	T15g/l	360.66±25.3 ^a	6.33±0.57 ^a	87.00±8.18 ^a
Sargassum natans	T25%	343.00±9.84 ^a	9.00±1.00 ^b	91.33±4.72 ^{ab}
	T50%	346.66±2.88 ^a	9.33±1.15 ^b	93.33±7.63 ^{ab}
	T100%	347.66±2.51 ^a	10.3±0.57 ^b	111.6±10.4 ^b
<i>p</i>		0.39	0.001	0.04

In same column, numbers followed by same alphabetical letter are statistically identical at the 5% threshold according to Newman-Keuls test.

3.3 EFFECT OF NaCl SOLUTIONS AND SARGASSUM NATANS EXTRACTS ON NUMBER OF HANDS, FINGERS AND AVERAGE LENGTH OF MEDIAN FINGER

Average number of hands, fingers and average length of median finger on a bunch are recorded in Table 4. Average number of hands per bunches was statistically different depending on origin of vivo-plants ($p = 0.04$). This number varied from 6 to 7 in plants from NaCl-treated environments and from 7 to 9 in plants from Sargassum-treated environments. Average number of fingers per bunches was also influenced by treatments ($p = 0.001$). Greatest number of fingers (51 fingers) was observed in plants from environments treated with *Sargassum natans* extract (T100%) compared to 29 fingers for T15%. Statistical analysis revealed a highly significant difference for finger length parameter ($p = 0.001$). Average length of middle finger is greater in plants from Sargassum-treated environments (19 cm).

Table 4. Evaluation of number of hands and fingers per banana bunches

Elicitor	Treatment	Performance parameters		
		Number of hands per bunches	Number of fingers per bunches	Middle finger length (cm)
Control	water	7.33±0.75 ^{ab}	36.00±1.00 ^a	15.00±1.00 ^a
	T5g/l	7.00±3.75 ^{ab}	35.66±3.21 ^a	16.00±1.00 ^a
NaCl	T10g/l	6.33±0.75 ^{ab}	32.66±3.21 ^a	17.00±0.00 ^a
	T15g/l	6.00±3.75 ^a	29.00±2.64 ^a	16.66±0.57 ^{ab}
	T25%	8.00±6.75 ^{ab}	45.00±2.64 ^b	16.66±1.15 ^{ab}
<i>Sargassum natans</i>	T50%	7.66±0.75 ^{ab}	46.33±3.51 ^b	19.00±1.00 ^{bc}
	T100%	8.66±6.75 ^b	51.00±3.60 ^b	19.33±1.52 ^c
P		0,04	0,001	0.001

In same column, numbers followed by same alphabetical letter are statistically identical at the 5% threshold according to Newman-keuls test.

3.4 EFFECT OF NaCl SOLUTIONS AND SARGASSUM NATANS EXTRACTS ON BUNCHES AND MIDDLE FINGER MASS, AND YIELD

Table 5 presents data on mean bunches mass, mean middle finger mass and yield. Banana plants from environments treated with *Sargassum natans* extracts produced higher bunches mass. Bunches mass varied from 13.33 (Control) to 15.66 kg in plants from *Sargassum* treatments. Low bunches masses were recorded in plants from environments treated with NaCl solutions. Mean middle finger mass was higher in bunches of plants from environments treated with *S. natans* T50 (172g) and T100% (186 g). Regarding average yield per hectare, it was higher in plants from environments treated with *S. natans* compared to control. Average yield varied from 14.66 to 16.33 t/ha in plants from environments treated with *S. natans* extracts. Similarly, it varied from 13.66 to 16.66 t/ha in plants from environments treated with NaCl solutions.

Table 5. Evaluation of bunches mass, middle finger and yield

Elicitor	Treatment	Performance parameters		
		Average mass of bunches (kg)	Average mass of middle finger (g)	Estimate of Performance (t/ha)
Control	water	13.33±1.52 ^{ab}	162.66±2.51 ^c	14.33±0.57 ^a
	T5g/l	14.00±1.00 ^a	161.33±2.51 ^a	16.33±0.57 ^b
NaCl	T10g/l	13.33±0.57 ^{ab}	160.33±2.51 ^a	14.66±0.57 ^a
	T15g/l	11.66±1.52 ^b	157.66±3.05 ^d	13.66±0.57 ^a
	T25%	14.33±0.57 ^a	172.33±2.51 ^e	16.66±0.57 ^{bc}
<i>Sargassum natans</i>	T50%	15.66±1.15 ^a	183.00±2.64 ^b	18.33±0.57 ^d
	T100%	15.33±0.57 ^a	186.66±1.52 ^b	17.66±0.57 ^{cd}
P		0.005	0.001	0.001

In same column, numbers followed by same alphabetical letter are statistically identical at 5% threshold according to Newman-Keuls test

4 DISCUSSION

Plantain plays an important role in global food security and is a source of income for producers [5]. Several techniques have been developed to improve seed production of this plant as well as its yield. Our study is part of this approach by producing vivo-plants on media treated with sodium chloride (NaCl) solutions and liquid extract of *Sargassum natans* (ELS). Effects of stimulating banana vivo-plants with NaCl and ELS were evaluated in terms of plant growth and yield. Indeed, according to several authors, seaweed extracts are known for their ability to stimulate growth of cultivated plants since they contain growth regulators such as auxins, gibberellins, cytokinins, betaines and major nutrients [7], [8]. They are also considered effective biofertilizers in agriculture [9], [10]. Maximum height of plants treated with *S. natans* extracts was on average 312 cm compared to 280 cm for plants treated with NaCl solutions and 292 cm for control. Concerning circumference, it varied between 56 and 63 cm. These results are significantly higher than those obtained by [11]

on same banana cultivar and [12] on two false horn banana cultivars. However, our results are in agreement with previous work by [13] on effect of liquid extract of green algae (*Chaetomorpha linum*) on stimulation of germination and growth of durum wheat (*Triticum turgidum*) and [14] on tomato (*Lycopersicon esculentum*). It is shown that the growth and production of durum wheat (*T. durum*) were stimulated following use of liquid extract of brown algae *S. vulgare* [15]. High number of green leaves at flowering was similar to that observed in Big Ebanga banana cultivar studied by [16]. Increase in height and circumference of pseudo-stems of vivo-plants according to increasing NaCl concentrations would be an adaptive sign developed in banana to salt, as opposed to depressive effect observed in other sensitive glycophytes [17]. According to [18], high number of functional leaves at flowering is an essential characteristic to ensure good development of bunches and quality fruits. Best results were obtained with low concentrations of NaCl solutions (5g/L) and *S. natans* extracts (T50%). This is consistent with results of [8] obtained following application of lowest concentration (20 %) of liquid algal extract (*Codium decorticatum*) in pepper (*Capsium annum*) significantly increasing fresh mass, dry mass, and number of pods. Pretreatment of vivo-plants would thus have stimulated cellular metabolism allowing better fruit filling, heavier bunches and high yield.

However, reduction in number of leaves as flowering approaches observed in plants from environments treated with higher concentrations of NaCl solutions (10 and 15 g/L), could be explained by mobilization of photosynthesis products for growth and development of fruits to detriment of vegetative growth [19]. Average mass of bunches was 17 kg for plants treated with *S. natans* extracts with an average of 54 fruits per bunches, compared to 34 for control. Overall, there was a clear improvement in production characteristics of bunches of this variety by application of NaCl solutions and *S. natans* extracts. Indeed, several research studies have shown that algae contain different molecules such as polysaccharides, proteins, polyunsaturated fatty acids, pigments, polyphenols and minerals [20], [21]. Among these compounds, some are used as elicitors to stimulate natural defense of plants [8]. These seaweed extracts would facilitate retention of water in soil and absorption of trace elements (Cu, Zn, Mn, Fe, Co, N) necessary for plants [22]. In addition, [23] showed that seaweed extracts improved tolerance of plants to abiotic stresses such as drought and soil salinity. Our results confirmed excellent agronomic performances of banana cultivation obtained from vivo-plants from environments treated with *S. natans* extracts.

5 CONCLUSION

Adaptation to stress salinity is essential for crops in general and specifically cultivation of plantain intended to be cultivated in coastal area of Côte d'Ivoire. In light of results obtained, concentrations of NaCl (5g/l) and *Sargassum natans* (50 and 100%) improved growth and yield of plantain. These results support biostimulant potential of aqueous extract of *S. natans* which can be used for production of vivo-plants of plantains tolerant to salinity. These plants from a young age would have accumulated metabolites that promote their adaptation to stress salinity. In field, treatments promoted precocity of flowering and fruiting periods in plants from environments treated with NaCl and *S. natans* compared to controls. However, best yields were recorded by the application of *S. natans* extracts.

REFERENCES

- [1] G. V. Paka, P. K. Mobambo, B. A. Omondi and C. Staver, «Evaluation de l'efficacité de la macropropagation des cultivars de bananiers les plus préférés au Kongo Central, en RD Congo», *Afrique SCIENCE*, vol.19, no.6, pp.76-88, 2021.
- [2] B. N. M. Bangata, N. Ngbengbu and K. N. Mobambo, «Evaluation du potentiel de prolifération d'explants de différentes dimensions de bananier plantain (*Musa sp. cv. AAB*) par la macropropagation en conditions semi-contrôlées», *Revue Africaine d'Environnement et d'Agriculture*, vol.2, no.2, pp. 25-31, 2019.
- [3] P. Audrey, R. Pierre and R. R. Cédric, «Etude de la filière Banane Plantain en Côte d'Ivoire», Projet « Promotion et commercialisation de la Banane Plantain et du Manioc en Côte d'Ivoire » financé par le Comité Français pour la Solidarité Internationale (CFSI), p. 66, 2015.
- [4] T. O. S. Vawa, G. G. Philippe and S. S. Pacôme, «Etude de la Performance Economique de la Replantation Annuelle De Bananiers Plantain, Une Strategie De Gestion des Nematodes au Sud de la Cote D'Ivoire», *European Scientific Journal*, vol.17, no.34, p. 55, 2021.
- [5] André Lassoudière: le bananier et sa culture, Versailles, France, Éditions Quæ, 383p, 2007.
- [6] S. J. Gogbeu, J. K. Kouassi, A. Koutoua and D. O. Dogbo, «Study of salt stress in plantain banana (*Musa paradisiaca* L.): peroxydases and polyphenol oxidases activities, synthesis and accumulation of phenolic compounds in leaves and roots», *International Journal of Veterinary Science and Agriculture Research*, vol.1, no. 2, pp.1-16, 2019.
- [7] S. J. Gogbeu, S. E. Yapo, B. B.N. Goré, A. Koutoua, N. J. Kouassi, R. Nacanabo, D. O. Dogbo, and Y. J. Kouadio, «Effets du traitement des plants de riz (*Oryza sativa* L.) au chlorure de sodium sur la synthèse et accumulation des sucres totaux et des composés phénoliques ethanosolubles dans les feuilles et racines», *Journal of Applied Biosciences*, vol.135, pp. 13775-13787, 2019.
- [8] K. Godlweska, I. Michalak, L. Tuhy and K. Chojnacka, «Plant Growth Biostimulants Based on Different Methods of Seaweed Extraction with Water», *Frontiers in the Expansion of Bioproducts*, vol.2016, no.1, 11p, 2016.
- [9] D. R. F. Thiémélé, S. Traoré, N. Aby, P. Gnonhour, N. Yao, K. Kobenan, E. Konan, A. Adiko and N. Zakra, «Diversité et sélection participative de variétés locales productives de banane plantain de Côte d'Ivoire», *Journal of Applied Biosciences*, vol.114, pp. 11324-11335, 2017.

- [10] A. J. B.Djaha and G. M. Gnahoua, «Contribution à l'inventaire et à la domestication des espèces alimentaires sauvages de Côte d'Ivoire», *Journal of Applied Biosciences*, vol.78, pp. 6620-6629, 2014.
- [11] A. Labo, D. Sané, S. D. Ngom and L. E. Akpo, «Effet du sel sur le comportement des jeunes plants de palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.) en Basse Casamance», *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol.10, no.3, pp. 1312-1328, 2016.
- [12] A. L. Chebil, I. Ben Ammar, L. Ktari, D. Cherif, H. Cherifi and S. Sadok, « Effet de l'extrait liquide de l'algue verte *Chaetomorpha linum* (Müller) kütz. 1849 sur la germination et la croissance du blé dur *Triticum turgidum* l. subsp. Durum», *Bulletin de l'institut national des sciences et technologies de la mer de salammbo*, Vol. 46.212, 2019.
- [13] S. Vijayakumar, S. Durgadevi, P. Arulmozhi, S. Rajalakshmi, T. Gopalakrishnan and N. Parameswari, «Effect of seaweed liquid fertilizer on yield and quality of Capsicum annum L», *Acta Ecologica Sinica*, vol.39, no.5, pp. 406-410, 2019.
- [14] M. Sharma, K. M. Harinikumar and A. K. Singh, «Effect of Different Concentrations of Biofertilizers on the Growth and Yield of French Bean (*Phaseolus vulgaris*) Arka Anoop», *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, vol.9, no. 04, pp. 3072-3078, 2020.
- [15] A. Zafar, I. Ali and F. Rahayu, «Marine seaweeds (biofertilizer) significance in sustainable agricultural activities», *Earth and Environmental Science*, 974: 012080, 2022.
- [16] R. K. Kouakou, S. Traoré, T. Koné, M. Koné and D. O. Dogbo, «Performances comparées de vivo-plants issus de deux techniques de multiplication chez trois cultivars de bananier plantain [*Musa paradisiaca*, (musaceae)] à Azaguié», *Indian Journal of Plant Sciences*, vol. 8, no. 4, pp.116-126, 2019.
- [17] B. Tchigossou, J. Logbo and M. Zandjanakou-tachin, «Étude des paramètres agromorphologiques de bananiers plantains (*Musa* spp.): cas de deux cultivars de type Faux-corne au Sud du Bénin», *Afrique SCIENCE*, vol.15, no.3, pp. 1-11, 2019.
- [18] K. M. P. Chanthini, S. N. Sengottayan, S. R. Vethamonickam, Th. Annamalai, K. Sengodan, S. Haridoss, Sh. S. Narayanan, P. Radhakrishnan, and S. Ramaiah, «*Chaetomorpha antennina* (Bory) Kützing derived seaweed liquid fertilizers as prospective bio-stimulant for *Lycopersicon esculentum* (Mill)», *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, Vol.20, pp. 1-9, 2019.
- [19] S. Latique, M. A. Elouaer, H. Chernane, Ch. Hannachi and M. Elkaoua, «Effect of Seaweed Liquid Extract of *Sargassum vulgare* on Growth of Durum Wheat Seedlings (*Triticum durum* L) under salt stress», *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol.7, no. 4, pp. 1430-1435, 2014.
- [20] A. F. Nouck, V. D. Taffouo, E. Tsoata, D.S. Dibong, S.T. Nguemezi, I.Gouado and E.Youmbi, «Growth, biochemical constituents, micronutrient uptake and yield response of six tomato (*Lycopersicum esculentum* L.) cultivars grown under salinity stress», *Journal of Agronomy*, vol. 15, pp. 58-67, 2017.
- [21] H. Kaushal and S. Kukreja, «The Effect of Biofertilizers on Growth and Yield of Legumes», *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, vol. 9, no.11, pp 2606-2613, 2020.
- [22] S.T. Zodape, V. J. Kawarkhe, J. S. Patolia and A. D. Warade, «Effect of liquid seaweed fertilizer on yield and quality of okra (*Abelmoschus esculentus* L.)», *Journal of Scientific & Industrial Research*, vol. 67, pp. 1115-1117, 2008.
- [23] E. Nabti, B. Jha and A. Hartmann, «Impact of seaweeds on agricultural crop production as biofertilizer», *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol.14, pp. 1119-1134, 2017.
- [24] T. Arioli, W. M. Scott, I. Md Tohidul, T. L. Chi Tran, M. Weisser, P. Winberg, D.M. Cahill, «Applications of seaweed extracts in agriculture: An Australian perspective». *Journal of Applied Phycology*, vol. 36, pp. 713-726, 2024.
- [25] M. J. Van Oosten, O. Pepe, S. De Pascale, S. Silletti and A. Maggio, « The role of biostimulants and bioeffectors as alleviators of abiotic stress in crop plants», *Chemical and biological Technologies In Agriculture*, vol.4, no. 5, pp15-24, 2017.

MFCC number limit for automatic sound recognition: Application to the chainsaw sound identification

N'Tcho Assoukpou Jean GNAMELE¹, Bi Tra Jean Claude YOUAN², and Konan Fernand GBAMELE³

¹Department of Mathematics-Physics-Chemistry at University Peleforo Gon Coulibaly (UPGC), BP 1328 Korhogo, Côte d'Ivoire

²Technology Laboratory, Félix Houphouët-Boigny University (UFHB), 01 BP V34 Abidjan 01 Cocody, Côte d'Ivoire

³Optical Networks and Telecommunications Laboratory of the Joint Research and Innovation Unit in Engineering Science and Technology (UMRI-STI), National Polytechnic Institute Félix Houphouët-Boigny (INPHB), Bp 1093 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: This paper investigates the relevance of using a large number of Mel Frequency Cepstral Coefficients (MFCC) as descriptors of acoustic signals, and the interaction between these and the nature of the frequency band in which the Mel filters are arranged.

This study forms part of the wider field of automatic recognition of acoustic signals, with a particular focus on those that are not speech-related. We evaluated a series of MFCCs, spanning a range from 1 to 50, utilising the central octave band frequencies (31.5 Hz-16000 Hz) as the MFCC calculation frequencies. An application was made to the identification of chainsaw sounds among a plurality of signals from the forest environment.

The results revealed a threshold value for the number of MFCCs (LVMFCC) above which classification rates remain constant. The LVMFCC=39 was common to all frequencies, although specifically the LVMFCC for each centre frequency was between 5 and 39 MFCCs. We observed that the notion of an optimal value for the number of MFCCs could appear subjective. The best classification rate of 98.41% obtained with the 16000 Hz centre frequency corresponds to a number of MFCCs between 5 and 50. These results also reveal the need to restructure the.

KEYWORDS: acoustic, automatic recognition, KNN, MFCC, octave band.

1 INTRODUCTION

In the context of automatic recognition of speech and other signals not related to human language, several studies have demonstrated that 13 Mel frequency cepstral coefficients are an optimal choice for signal identification [1], [2]. However, numerous recent studies employ a comparatively large number of MFCCs in acoustic signal processing.

The rationale behind the selection of this extensive set of MFCCs remains opaque, with numerous scholars failing to elucidate the frequency band utilized in their derivation.

Indeed, in reference [3], the authors employ a convolutional deep learning model for the classification of respiratory diseases based on patients' respiratory sound signals with MFCCs as descriptors. There are 32 MFCCs in total. In this paper [4], the authors present a neural sensor fusion framework for drone detection based on audio and video data. With regard to the audio stream, the authors evaluate the Long Term Memory (LSTM) and Convolutional Recurrent Neural Network (CRNN) models and demonstrate the superiority of the CRNN model, which is based on Mel Frequency Cepstral Coefficients (MFCC) features, of which there are 40. In [5], the authors put forth a multimodal approach to traffic light status detection, employing both visual and auditory cues, as seen from the perspective of a quadruped robot traversing an urban setting. A cross-comparison between N MFCCs (with N ranging from 10, 12, 14, 16, 18, 20, 24 and 28) revealed that 24 MFCCs were optimal.

In their work [6], the authors examine the resilience of fully supervised convolutional neural networks (CNNs) and cutting-edge transfer learning methodologies within the domain of automatic speech recognition. The authors assess the influence of the number of Mel Frequency Cepstral Coefficients (MFCCs) on the word error rate (WER) by considering a range of MFCCs, from 10 to 24.

This study [7] presents an optimal method for the classification of cardiac noise based on machine learning technologies, with the objective of predicting cardiovascular diseases. In this study, the number of MFCC descriptors employed was 13, 25 and 42.

In another study [8], a novel approach to oestrus sound recognition was proposed, utilizing a fusion of two representative features as inputs and convolutional neural networks (CNNs) as the training model. The descriptors employed were MFCCs, with a total of 30, 40 and 50 coefficients.

In reference [9], a model of sound quality within high-speed trains (HSTs) is proposed. The model combines MFCC with convolutional neural networks (CNN) for the assessment of sound quality in high-speed trains (HSTs). The number of frequency cepstral coefficients is 26.

In [10], the authors assess the efficacy of the convolutional neural network in discerning the diverse spectral attributes of acoustic signals, utilizing two widely-used open databases: The Ryerson Audio-Visual Database of Emotional Speech and Song (RAVDESS) and the Berlin Database of Emotional Speech (EmoDB) were employed in this study. Five spectral representations are extracted from the original audio files, comprising 20 MFCC.

In the aforementioned literature, the authors do not explicitly indicate the reasons justifying the choice of MFCCs and/or do not mention the frequency bands used to obtain these coefficients. However, two key characteristics emerge in the calculation of MFCCs:

The frequency at which the signals are studied, namely the frequency at which Mel's filter banks are arranged.

The number of MFCCs.

In light of this work, two questions arise:

It would be beneficial to ascertain whether there is a dependency between the number of Mel frequency cepstral coefficients and the frequency band of the Mel filter arrangement for a given study.

Does the number of Mel frequency cepstral coefficients reach a point where it is no longer a determining factor in the recognition of study samples?

In this study, we address these questions by applying the aforementioned methodology to the identification of chainsaw samples among a number of environmental signals likely to be perceived in a forest environment. The following section presents the methodology employed in this study.

Section 2 outlines the methodology employed in this study. Section 3 presents the results, while Section 4 offers a discussion of these findings. The paper concludes in Section 5.

2 METHODS

2.1 MATERIALS

Given that the object of study is acoustic signals, it is necessary to construct a database that will be employed both for training our classifiers and for evaluating their performance. The study is based on two distinct labeling classes. The training phase comprises two classes. The chainsaw class comprises the acoustic signals produced by chainsaws, while the forest class encompasses all other sounds. The chainsaw class comprises audio recordings of chainsaws made in the Armainvilliers Sunday forest (Gretz-Armainvilliers, France) and chainsaw sounds sourced from an online database. The forest class is constituted by the sounds of diverse fauna and avifauna, as well as vehicle and meteorological sounds, including the auditory signature of precipitation. The sounds were sourced from online databases.

The test phase comprises chainsaw sounds, recorded at two forestry sites in Côte d'Ivoire: the Yapo-Abbe classified forest (Agboville, Côte d'Ivoire) and the National Floristic Centre (Abidjan, Côte d'Ivoire).

The recordings made at the forestry centers were made using a DR-05 dictaphone with a sampling rate of 44.1 *kHz*. The distance between the transmission source and the dictaphone was between 10 and 100 meters.

A total of 1400 sound samples were utilized for the training phase, while 565 sound samples were employed for the test phase. All of the sound samples are in the WAV format and are 5 seconds in duration, with a stereo recording. The distribution of sound samples by phase and class is presented in Table 1.

Table 1. Breakdown of sound samples by phase and class

Training phase		Test phase
Forest class	Chainsaw class	Chainsaw class
1043	357	565

2.2 TASKS AND METHODS

2.2.1 MEL FREQUENCY CEPSTRAL COEFFICIENTS

The Mel-frequency cepstral coefficient (MFCC) is a widely utilised feature that has been employed in numerous applications, particularly in sound signal processing [11]. The MFCC can be calculated by conducting five consecutive processes. These are: signal framing, computing of the power spectrum, application of a Mel filter bank to the obtained power spectra, calculation of the logarithm values of all filter banks, and finally, application of the DCT (Discrete Cosine Transform) to Mel's frequency spectrum.

2.2.2 SIGNAL STRUCTURE FOR MFCC CALCULATION

The acoustic signal employed to obtain Mel's frequency cepstral coefficients is the result of merging the two channels of the stereo signal obtained after recording. This approach is analogous to that developed in [1]. This method of restructuring the study signal will be compared with the case where a single channel is used to obtain the MFCCs. This comparison will enable us to assess its impact on the results obtained.

The resulting signal is as follows:

$$s_{resultant}(n) = [C_{L_1}; C_{R_1}; C_{L_2}; C_{R_2}; \dots; C_{L_{m-1}}; C_{R_{m-1}}; C_{L_m}; C_{R_m}] \quad (1)$$

- C_{L_i} : left channel component
- C_{R_i} : right channel component
- m : number of samples in the signal frame.

This restructuring of the acoustic signal is applicable to both the test phase and the training phase samples.

The resulting signal, designated as $s_{resultant}(n)$, is then segmented into a one-second signal, as illustrated in Fig. 1, with no overlap between the sub-frames $s_{resultant_i}(n)$.

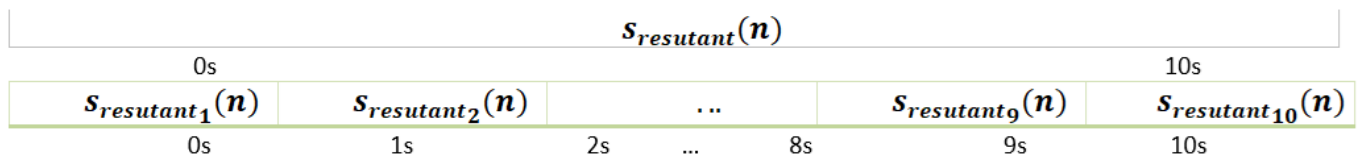


Fig. 1. Segmentation of the signal resulting from merging the left and right channels

We compute the MFCCs for each of the 10 "subframes" $s_{resultant_i}(n)$, for which we keep the first N MFCCs. We use the $10 \times N$ coefficients obtained to construct the descriptor vector of the signal. This vector descriptor is of type $1 \times 10N$.

2.2.3 THE FREQUENCY BAND FOR THE MEL FILTER BANK

The configuration of the Mel filter banks is based on the center frequencies of the octave bands, which range from 31.5 Hz to 16 kHz. The Mel filter banks will be evaluated by assessing the center frequencies of each octave band. Octave band analysis is a valuable tool in sound measurement as it offers an accurate representation of the human auditory response. This is an intriguing aspect as it aligns with the fundamental premise behind MFCC. The selected number of Mel filters is 35 [1].

2.2.4 K- NEIGHBOURHOOD ALGORITHM (KNN)

K-Nearest Neighbors (KNN) is a relatively straightforward machine learning algorithm that is commonly employed for classification purposes [12]. The algorithm is based on the minimum distance between the test point and all training points, which may be calculated using a variety of distance metrics, such as the Euclidean distance. Subsequently, the class of the test point is determined by the most frequent class of the k nearest neighbors of the test point. The most commonly utilized distances include: Consequently, the value of k is of significant importance and should be meticulously planned, as a low k value could potentially result in overfitting. The value of k is three (03) [1].

3 RESULTS

3.1 STUDY OF THE INFLUENCE OF THE NUMBER OF THE MFCC ON THE OCTAVE FREQUENCY BAND

Figs. 1 to 3 illustrate the impact of augmenting the number of Mel's frequency cepstral coefficients on the classification rate for each octave band center frequency. The curves in these figures are organized not on the basis of the central frequencies, but rather on the basis of closely related classification rates.

These figures facilitate an understanding of the MFCC values for which the dependency between the number of MFCCs and the classification rate is disrupted.

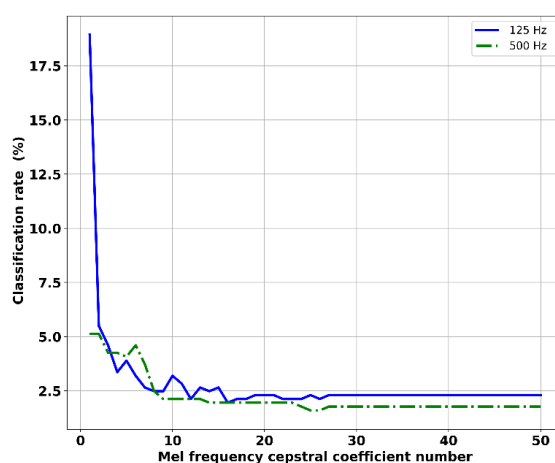


Fig. 2. Classification rate according to MFCC number for 125 Hz, 500 Hz

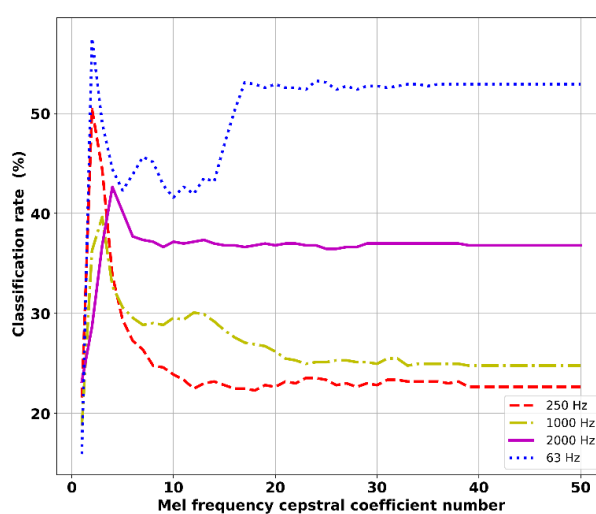


Fig. 3. Classification rate according to MFCC number for 63 Hz, 250 Hz, 1000 Hz, and 2000 Hz

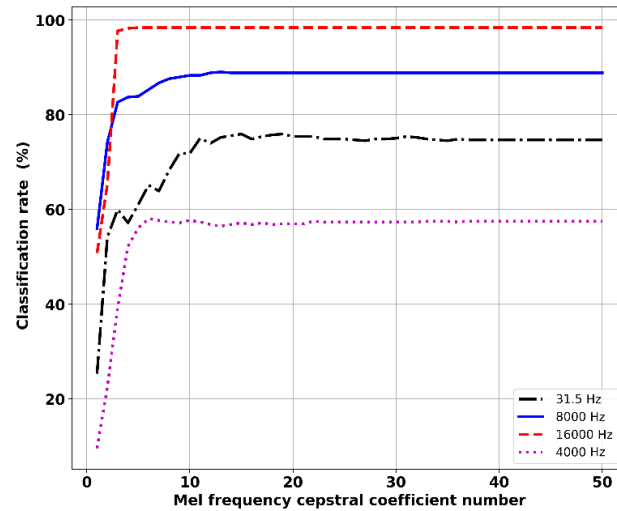


Fig. 4. Classification rate according to MFCC number for 31.5 Hz, 4000Hz, 8000 Hz, and 16000 Hz

The evolution of the classification rate as a function of the number of MFCCs can be divided into two phases: a “*constant*” phase and a “*quasi-constant*” phase.

The “*constant*” phase is characterized by a point on the curve at which there is no further change in the value of the classification rate from the given value of the number of MFCCs. This value of the MFCCs number is designated the limit value of the number of MFCCs (LVMFCC). Table 2 illustrates the LVMFCC for each octave band center frequency.

Table 2. “*constant*” phase

octave band centre frequency (Hz)	31.5	63	125	250	500	1000	2 000	4 000	8 000	16 000
range of cepstral coefficient number	≥ 37	≥ 36	≥ 27	≥ 39	≥ 27	≥ 39	≥ 39	≥ 37	≥ 14	≥ 5
LVMFCC classification rate(%)	74.69	52.92	2.3	22.65	1.77	24.78	36.81	57.52	88.85	98.41

The classification rates presented in Table 2 do not necessarily correspond to the highest classification rates for the specified frequency bands.

The “*quasi-constant*” phase results in the appearance of the LVMFCC, which is then followed by a variation in the classification rate up to the *constant* phase. In the quasi-constancy phase, multiple LVMFCC values may be observed. The selected value is that for which the rate of change is less than 1%. This variation in the rate is attributable to a small number of values for the number of cepstral coefficients, which exhibit a change in the classification rate. Table 3 illustrates the values for each central frequency, as well as the discrepancies between the peak of this fluctuation and the minimum value.

The values of the intervals vary according to the center frequency under consideration, encompassing a range of 11 to 40 Mel frequency cepstral coefficients.

It would appear that, contingent on the nature of the frequency band (see Table 2), there is a clearly defined LVMFCC for each octave band center frequency.

For a number of coefficients equal to or greater than, the classification rates are contingent upon the nature of the frequency band in which the Mel frequency cepstral coefficients are obtained: it is found to remain constant. We observe that the classification rates are not identical for all study frequencies. Indeed, the highest classification rate of is achieved for the central frequency of.

Table 3. Fluctuation in the classification rate: "quasi-constant" phase

octave band centre frequency (Hz)	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
range of cepstral coefficient number	≥ 26	≥ 18	≥ 19	≥ 20	≥ 24	≥ 33	≥ 15	≥ 22	≥ 12	≥ 5
fluctuation in classification rates (%)	0.89	0.88	0.18	0.89	0.18	0.18	0.53	0.18	0.18	0

3.2 THE ADVANTAGES OF SIGNAL RESTRUCTURING: THE COMBINATION OF THE LEFT AND RIGHT AUDIO CHANNELS

The results displayed in Fig. 2 to 4 were derived by integrating Channels 1 and 2, as illustrated in (1). This approach has an impact on the quality of the information extracted from the signal under study, which in turn affects the Mel frequency cepstral coefficients obtained. Fig. 6 illustrates the classification rates obtained and the LVMFCC when the channels are not merged, but a single channel is utilised for the calculation of the MFCCs.

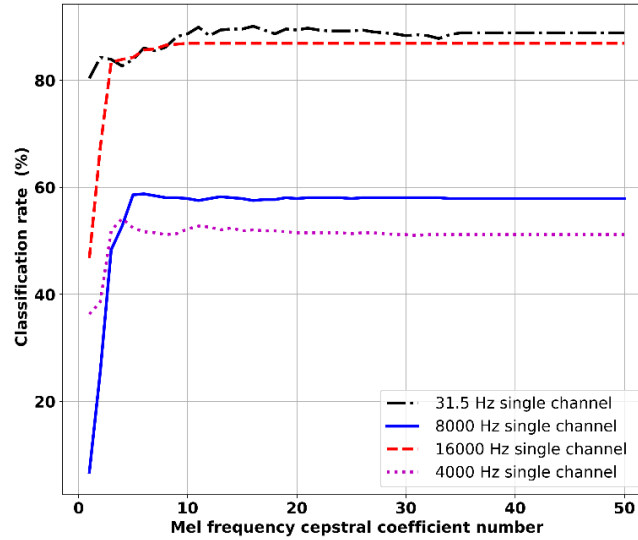


Fig. 5. Classification rate according to MFCC number for 31.5 Hz, 8000 Hz, and 16000 Hz single channel

The signal then assumes the following form:

$$s_{one-channel}(n) = [C_{L_1}; C_{L_2}; \dots; C_{L_{m-1}}; C_{L_m}] \quad (2)$$

The signal, $s_{one-channel}(n)$ is then divided into a one-second signal, as demonstrated in Fig. 6, with no overlap between the $s_{one-channel_i}$ subframes.

The MFCCs are computed for each of the 5 "subframes" $s_{one-channel_i}$, with the first N MFCCs retained for each.

The $5 \times N$ coefficients are then employed in the construction of the signal descriptor vector. This vector descriptor is of type $1 \times 5N$. In this phase, only the frequencies illustrated in Fig. 3 are considered, given their high classification rate.

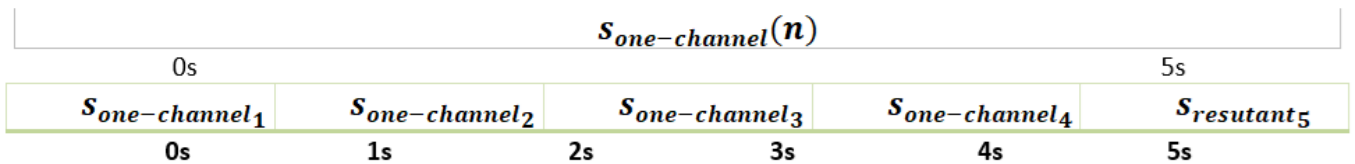


Fig. 6. Segmentation of one channel

We observe a change in the LVMFCC. The classification rate for the central frequency of 31.5 Hz exhibits a notable increase, reaching values of (14.16% at the maximum) and (14.16% at LVMFCC)), in comparison with the classification rates observed for the other two frequencies.

The classification rates for 8000 Hz and 16000 Hz exhibit a notable decline and are respectively (30.27% (maximum value) and 30.97% (upper LVMFCC)) and (11.51% (maximum value) and 11.51% (upper LVMFCC)).

Additionally, an increase in the LVMFCC is observed for 8000 Hz and 16000 Hz, while this value decreases for 31.5 Hz. Table 4 presents a comparison of the LVMFCC values obtained through the application of Eqn. (1) and Eqn. (2).

Table 4. comparative analysis of the values for channel fudging and for a single channel

octave band centre frequency (Hz)	Merging of channels 1 & 2			One channel		
	LVMFCC classification rate (%)	The maximum classification rate (%)	LVMFCC	LVMFCC classification rate (%)	The maximum classification rate (%)	LVMFCC
31.5	74.69	75.93	37	88.85	90.09	35
8000	88.85	89.03	14	57.88	58.76	34
16000	98.41	98.41	5	86.9	86.9	10

The LVMFCC is applicable at frequencies of 16000 Hz and 8000 Hz, with the former being approximately twice as high as the latter. It is therefore evident that the structure of the processed signal represents a significant factor in the calculation of relevant characteristics for MFCCs.

4 DISCUSSION

It is important to indicate the specific frequency band employed to obtain the MFCCs, as illustrated in Figs. 1 to 3, during the calculation process. This value has a substantial impact on the quality of information extracted from the signal and, consequently, on the precision and reliability of the obtained results. However, the articles [1-9] do not address this factor. Information is provided regarding the potential filters for noise reduction [13], [14], the frequency band containing the signal information [15], and the sampling rate [13], [16], [17]. While this information is undoubtedly valuable, it does not provide a definitive indication of the precise frequency at which Mel's filter banks should be positioned. Nevertheless, the optimal value for the number of Mel frequency cepstral coefficients can be determined based on the specific characteristics of the frequency band in question.

The objective of the descriptor-classifier combination in the context of pattern recognition is twofold: firstly, to optimize the expected results and secondly, to reduce the information processing time.

The results demonstrate that there is a threshold beyond which the number of MFCCs is no longer indicative of relevant information. This results in more complex calculations, which consequently reduces the time taken to process the information.

Discussing the optimal number of MFCCs for achieving favorable outcomes becomes inherently subjective when we extend beyond the VLMFCC. This aspect does not provide sufficient justification for the selection of the number of MFCCs, particularly in light of the findings presented by the aforementioned authors. The number of MFCCs is a value intrinsic to the choice of study frequency and to signal processing linked to the structure of the signal (fusion of data, one channel, etc.). Therefore, a generalization of its value will not be appropriate without well-defined information.

We note that the concept of an optimal value for the number of MFCCs [5], may appear to be overly subjective in certain configurations. With regard to the center frequency of 16 kHz, the highest classification rate (98.41%) is observed for a number of MFCCs between 5 and 50. The number of MFCCs equal to 5 is not *the optimum* value, but rather *a value that optimises the classification rate*. This is particularly evident when considering that all the MFCC values greater than 5 give the same optimum classification rate. This observation was made for the 31.5 Hz frequency, where the number of coefficients 15 and 19 yielded the same value of 75.93%. The same is true for the 500 Hz frequency, where the maximum classification rate of 5.13% corresponds to the number of MFCCs 1 and 2.

5 CONCLUSION

The selection of the number of Mel cepstral coefficients appears to be a parameter contingent upon the specific frequency band that has been selected. The values of the classification rates are inherently contingent upon these variables and necessitate the communication of their intrinsic nature. In the field of automatic sound recognition, particularly in the context of chainsaw signals, there exists a value for the number of Mel Cepstral Coefficients (MFCCs) that exceeds a threshold beyond which the interaction between the number of MFCCs and the nature of the frequency band is no longer linear (LVMFCC). A study of octave band center frequencies (31.5 Hz – 16 kHz) has revealed limit values for the number of MFCCs in the range [5 – 50]. However, for an LVMFCC of 39, the classification rate remains constant for all frequencies studied. Thus, determining the limit value for a given study frequency avoids selecting an excessively large value for the number of MFCCs, which would have no impact on classification. The sole consequence of this large number is that the calculation will become more complex, necessitating a greater number of iterations to run the identification algorithms.

The structure of the signal is contingent upon the nature of the frequency band and the selection of the number of Mel-frequency cepstral coefficients (MFCCs). To illustrate, the restructuring of an audio signal by combining the left and right channels into a single signal has been demonstrated to markedly enhance the classification rate in comparison to the utilization of a single channel of the audio acquisition for information extraction.

In consideration of these factors, the center frequency of 16 kHz yields the optimal classification rate of 98.41% for a number of MFCCs of 5. Notably, this rate is consistent across all values of the number of MFCCs exceeding or equal to 5 for the same octave band centre frequency.

REFERENCES

- [1] N. A. J. Gnamele, B. T. J. C. Youan, et A. M. L. Famien, « Improvement of chainsaw sounds identification in the forest environment using maximum ratio combining and classification algorithm », *Eureka: PE*, n° 3, p. 3-16, mai 2024. doi: 10.21303/2461-4262.2024.003107.
- [2] N. A. J. Gnamele, Y. Berenger, T. Arsene, G. Baudoin, et J.-M. Laheurte, « KNN and SVM Classification for Chainsaw Sound Identification in the Forest Areas », *IJACSA*, vol. 10, n° 12, 2019, doi: 10.14569/IJACSA.2019.0101270.
- [3] N. Babu, J. Kumari, J. Mathew, U. Satija, et A. Mondal, « Multiclass Categorisation of Respiratory Sound Signals Using Neural Network », in *2022 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)*, Taipei, Taiwan: IEEE, oct. 2022, p. 228-232. doi: 10.1109/BioCAS54905.2022.9948675.
- [4] I. Alla, H. B. Olou, V. Loscri, et M. Levorato, « From Sound to Sight: Audio-Visual Fusion and Deep Learning for Drone Detection », in *Proceedings of the 17th ACM Conference on Security and Privacy in Wireless and Mobile Networks*, Seoul Republic of Korea: ACM, mai 2024, p. 123-133. doi: 10.1145/3643833.3656133.
- [5] S. Gupta et A. Cosgun, « Audio-Visual Traffic Light State Detection for Urban Robots », 2024, *arXiv*. doi: 10.48550/ARXIV.2404.19281.
- [6] A. M. Samin et al., « BanSpeech: A Multi-Domain Bangla Speech Recognition Benchmark Toward Robust Performance in Challenging Conditions », *IEEE Access*, vol. 12, p. 34527-34538, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3371478.
- [7] Y. N. Fuadah, M. A. Pramudito, et K. M. Lim, « An Optimal Approach for Heart Sound Classification Using Grid Search in Hyperparameter Optimization of Machine Learning », *Bioengineering*, vol. 10, n° 1, p. 45, déc. 2022. doi: 10.3390/bioengineering10010045.
- [8] P. Chen, D. Yin, B. Yang, et W. Tang, « A Fusion Feature for the Oestrous Sow Sound Identification Based on Convolutional Neural Networks », *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2203, n° 1, p. 012049, févr. 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2203/1/012049.
- [9] P. Ruan, X. Zheng, Y. Qiu, et Z. Hao, « A Binaural MFCC-CNN Sound Quality Model of High-Speed Train », *Applied Sciences*, vol. 12, n° 23, p. 12151, nov. 2022, doi: 10.3390/app122312151.
- [10] M. H. Pham, F. M. Noori, et J. Torresen, « Emotion Recognition using Speech Data with Convolutional Neural Network », in *2021 IEEE 2nd International Conference on Signal, Control and Communication (SCC)*, Tunis, Tunisia: IEEE, déc. 2021, p. 182-187. doi: 10.1109/SCC53769.2021.9768372.
- [11] Z. Kh. Abdul et A. K. Al-Talabani, « Mel Frequency Cepstral Coefficient and its Applications: A Review », *IEEE Access*, vol. 10, p. 122136-122158, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3223444.
- [12] Y. Alsouda, S. Pillana, et A. Kurti, « IoT-based Urban Noise Identification Using Machine Learning: Performance of SVM, KNN, Bagging, and Random Forest », in *Proceedings of the International Conference on Omni-Layer Intelligent Systems*, Crete Greece: ACM, mai 2019, p. 62-67. doi: 10.1145/3312614.3312631.
- [13] F. Li, Z. Zhang, L. Wang, et W. Liu, « Heart sound classification based on improved mel-frequency spectral coefficients and deep residual learning », *Front. Physiol.*, vol. 13, p. 1084420, déc. 2022, doi: 10.3389/fphys.2022.1084420.

- [14] B. Al-Naami, H. Fraihat, J. Al-Nabulsi, N. Y. Gharaibeh, P. Visconti, et A.-R. Al-Hinnawi, « Assessment of Dual-Tree Complex Wavelet Transform to Improve SNR in Collaboration with Neuro-Fuzzy System for Heart-Sound Identification », *Electronics*, vol. 11, n° 6, p. 938, mars 2022, doi: 10.3390/electronics11060938.
- [15] W. Hu, S. Feng, B. Zhang, Y. Gao, X. Xiao, et Qi-Huang, « Hybrid feature extraction method of MFCC+GFCC helicopter noise based on wavelet decomposition », *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2478, n° 12, p. 122008, juin 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2478/12/122008.
- [16] H. Yan, H. Bai, X. Zhan, Z. Wu, L. Wen, et X. Jia, « Combination of VMD Mapping MFCC and LSTM: A New Acoustic Fault Diagnosis Method of Diesel Engine », *Sensors*, vol. 22, n° 21, p. 8325, oct. 2022, doi: 10.3390/s22218325.
- [17] L. P. Sahu, G. Pradhan, et J. P. Singh, « Modeling Sub-Band Information Through Discrete Wavelet Transform to Improve Intelligibility Assessment of Dysarthric Speech », *IJIMAI*, vol. 7, n° 7, p. 56, 2022, doi: 10.9781/ijimai.2022.10.003.

Structure du peuplement des espèces de bois d'œuvre menacées du massif forestier de Yapo-Abbe (Côte d'Ivoire)

[Structure of threatened timber species in the Yapo-Abbe forest massif (Côte d'Ivoire)]

Sié Fernand Pacôme OUATTARA¹, Aboubacar OUATTARA², Franck Placide Junior PAGNY³, and Kouassi KOUADIO⁴

¹Laboratoire de l'Amélioration de la Production Agricole, UFR Agroforesterie, Université Jean Lorougnon Guédé, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire

²Laboratoire de Biologie Végétale et des Sciences de la Terre, UFR des Sciences et Technologies, Université Alassane OUATTARA, BPV 18 Bouaké 01, Côte d'Ivoire

³Laboratoire de Biodiversité et Gestion Durable des Ecosystèmes, UFR Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire

⁴Laboratoire des Milieux Naturels et Conservation de la Biodiversité, UFR Biosciences, Université Félix HOUPOUËT-BOIGNY, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

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

ABSTRACT: The study was conducted in the Yapo-Abbe Forest Massif, located in southeastern Cote d'Ivoire. it aims to analyze the population structure of timber species listed on the 2018 IUCN Red List. The surface survey method was used for the inventory and identification of these species across the three biotopes of the massif (secondary forest, reforested forest, and fallow land). The results show that the Yapo-Abbe Forest Massif harbors twenty-four (24) timber species listed on the 2018 IUCN Red List. These species are categorized into seventeen (17) vulnerable species, five (05) species of least concern, one (01) near-threatened species, and one (01) endangered species. The vegetation structure analysis indicates that in the secondary forest and fallow land biotopes, the population of the twenty-four (24) inventoried species is relatively balanced despite anthropogenic pressures. However, in the reforested forest biotope, the population of these species is disturbed and unbalanced. The assessment of regeneration potential reveals that the twenty-four (24) inventoried species struggle to regenerate in the secondary forest and reforested forest biotopes. In these vegetation formations, species regeneration is hindered by the denser canopy and intra- and/or interspecific competition. However, in the fallow land biotope, the twenty-four (24) inventoried species exhibit good regeneration potential.

KEYWORDS: Structure, Timber, Threatened, Red List, Regeneration, Yapo-Abbe, Cote d'Ivoire.

RESUME: L'étude réalisée dans le Massif Forestier de Yapo-Abbé, au Sud-Est de la Côte d'Ivoire vise à analyser la structure du peuplement des espèces de bois d'œuvre inscrites sur la liste rouge de l'UICN de 2018. La méthode de relevé de surface a été utilisée pour l'inventaire et l'identification des espèces, dans les trois biotopes du massif. Les résultats montrent que le Massif Forestier de Yapo-Abbé est riche de 24 espèces de bois d'œuvre inscrites sur la liste rouge de l'UICN de 2018. Ces espèces se répartissent en 17 espèces vulnérables, 05 espèces de préoccupation mineure, 01 espèce quasi-menacée et 01 espèce en danger de disparition. L'analyse de la structure de la végétation montre que dans les biotopes forêt secondaire et jachère, le peuplement des 24 espèces inventoriées est plus ou moins équilibré, en dépit des pressions anthropiques. Dans le biotope forêt reboisée, le peuplement de ces espèces est par contre perturbé et déséquilibré. L'évaluation du potentiel de régénération révèle que les 24 espèces inventoriées ont du mal à se régénérer dans les biotopes forêt secondaire et forêt reboisée. Dans

ces formations, la régénération des espèces est gênée par la canopée, qui est plus fermée et les phénomènes de compétition intra et/ou interspécifique. Cependant, dans le biotope jachère, les 24 espèces inventoriées ont un bon potentiel de régénération.

MOTS-CLEFS: Structure, bois d'œuvre, menacées, liste rouge, Régénération, Yapo-Abbé, Côte d'Ivoire.

1 INTRODUCTION

Considéré autrefois, comme l'un des écosystèmes tropicaux les plus diversifiés, le couvert forestier ivoirien est aujourd'hui l'un des plus perturbés et menacés [1], [2]. En effet, les activités anthropiques (l'exploitation forestière pour grumes, l'agriculture, l'élevage et l'urbanisation) ont entraîné la destruction de plus de 83% des surfaces forestières, mettant en péril les biens et services qui leur sont associés. Avec l'un des niveaux les plus élevés de déforestation, en Afrique subsaharienne [3], [4], la Côte d'Ivoire perd chaque année plusieurs hectares de forêt, occasionnant la réduction de la biodiversité et la disparition de plusieurs espèces de plantes, dont celles de bois d'œuvre [5], [6]. De plus, les peuplements adultes à diamètre exploitable de la quasi-totalité des espèces de bois d'œuvre sont de plus en plus rares [7], [8], si bien que, 60% de celles couramment exploitées dans les forêts sont inscrites sur la liste rouge de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature, version 2018.

Avec une valeur écologique importante (126 espèces endémiques, 51 espèces rares et/ou menacées), le Massif Forestier de Yapo-Abbé (MFYA) n'échappe pas au phénomène de déforestation que connaît la plupart des forêts du pays [1], [2]. Ce qui entraîne la réduction de la biodiversité dans ledit massif. Il s'en suit dès lors, une transformation du milieu caractérisé par des changements dans l'occupation du sol, la modification du paysage et un changement important dans la structure de la végétation [9]. Une gestion durable des espèces de bois d'œuvre s'avère indispensable pour la sauvegarde des forêts ivoiriennes, en général et du MFYA, en particulier.

Face aux enjeux écologiques et environnementaux, il est important d'étudier la structure des peuplements des espèces de bois d'œuvre inscrites sur la liste rouge de l'UICN, dans le MFYA, afin de suivre leur évolution au cours du temps, d'une part et de mettre en évidence les impacts qu'ils subissent d'autre part. Cela permettra de trouver des solutions, pour une gestion éclairée et durable de ces ressources et du MFYA.

L'objectif général de cette étude est d'évaluer la diversité structurale des espèces de bois d'œuvre inscrites sur la liste rouge de l'UICN, recensées dans le MFYA. Plus spécifiquement, il s'agit d'analyser la structure du peuplement des espèces de bois d'œuvre inscrites sur la liste rouge de l'UICN de 2018, inventoriées et d'évaluer leur potentiel de régénération, dans le MFYA.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 SITE D'ETUDE

La présente étude a été réalisée dans le MFYA, au Sud-Est de la Côte d'Ivoire, dans la région administrative de l'Agnéby-Tiassa, avec une superficie évaluée à 28790 ha [10]. Il est situé entre 5°40'02" et 5°47'32" de Latitude Nord et 3°57'02" et 4°11'37" de Longitude Ouest et est à cheval sur les Sous-préfectures d'Azaguié du Département d'Agboville et de Yakassé-Mé du Département d'Adzopé (Figure 1). Il comprend trois (03) biotopes: la forêt secondaire avec 19001,4 ha, la forêt reboisée ou plantations forestières avec 4318,5 ha et le bloc jachère avec 5470,1 ha (Figure 2). Le climat de type subéquatorial est caractérisé par une pluviométrie moyenne d'environ 1400 mm/an et par une température moyenne annuelle de 27°C [11]. L'aspect général de la végétation du MFYA est du type forêt dense humide sempervirente, caractéristique du secteur ombrophile, d'après les subdivisions établies par [12].

Le matériel biologique utilisé au cours de cette étude est constitué des espèces de bois d'œuvre inscrites sur la liste rouge de l'UICN de 2018, rencontrées dans le MFYA.

2.2 COLLECTE DE DONNEES

L'inventaire floristique a été réalisé dans les trois (03) biotopes du MFYA, sur la base de la méthode des relevés des surfaces. Ainsi, le dispositif d'échantillonnage est constitué d'une parcelle rectangulaire de 100 m de longueur et 50 m de largeur, soit une superficie de 0,5 ha, pour l'inventaire des tiges dont le diamètre à hauteur de poitrine est supérieur ou égal à 10 cm (DHP $\geq$ 10 cm). Sur la médiane verticale de la parcelle, quatre (04) placettes de 10 m de côté, soit une superficie de 100 m² chacune,

et équidistantes de 20 m, ont été installées, pour l'inventaire des tiges de régénération ($2,5 \leq \text{DHP} \leq 10 \text{ cm}$) des espèces de bois d'œuvre inscrites sur la liste rouge de l'UICN (Figure 3). Au total, 60 parcelles ont été installées dans le MFYA, à raison de 20 parcelles par biotope.

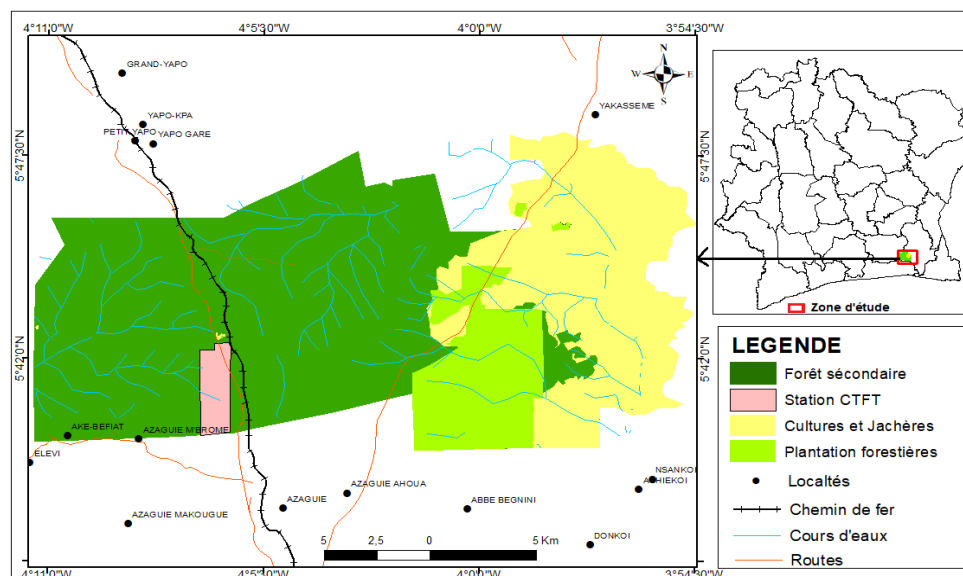


Fig. 1. Localisation du Massif Forestier de Yapo-Abbé



Fig. 2. Vues partielles des biotopes du Massif Forestier de Yapo-Abbé

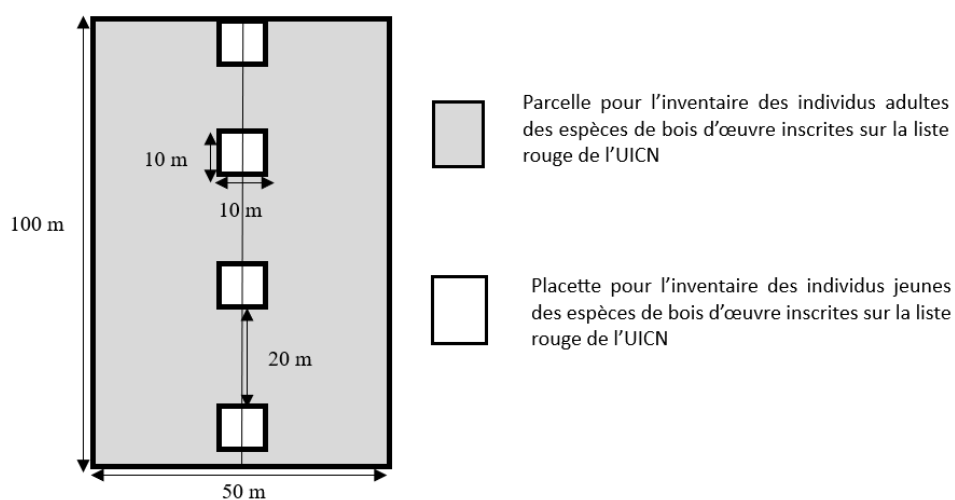


Fig. 3. Dispositif d'échantillonnage

2.3 ANALYSE DES DONNEES

2.3.1 STRUCTURE DE LA VEGETATION

Dans chacun des trois biotopes du MFYA, la liste des espèces de bois d'œuvre inscrites sur la liste rouge de l'UICN a été dressée. La compilation des trois (03) listes floristiques a permis d'obtenir la richesse spécifique totale. La clé d'identification de [13] a été utilisée pour l'identification des espèces. Les noms des espèces et des familles ont été mises à jour selon [14].

L'analyse de la composition floristique a consisté à relever pour chacune des espèces inventoriées la catégorie commerciale (P1: espèces principales de première catégorie; P2: espèces principales de deuxième catégorie; P3: espèces principales de troisième catégorie) et le statut de conservation selon l'UICN. À cet effet, les travaux de [15], [16], [17] et la liste rouge de l'UICN version 2018, ont servi de référence.

La structure du peuplement des espèces de bois d'œuvre inscrites sur la liste rouge de l'UICN, inventoriées a été analysée à travers la densité, l'aire basale et la distribution des tiges par classes de diamètre ou structure diamétrique. La densité traduit l'occupation du sol par les espèces [18]. L'aire basale traduit mieux l'occupation horizontale du sol par les individus des espèces végétales. C'est l'un des indicateurs utilisés pour la gestion sylvicole [19]. Elles se traduisent par les expressions mathématiques suivantes:

$$D = n/s$$

Avec D: densité exprimée en tiges/ha, n: nombre de tiges recensées et S la surface en ha.

$$S = (D^2 \times \pi / 4)$$

Avec S l'aire basale exprimée en m²/ha; D le diamètre en m.

La distribution des tiges par classes de diamètre des espèces de bois d'œuvre inscrites sur la liste rouge de l'UICN de 2018, inventoriées, a permis de construire pour chaque biotope du MFYA, un histogramme qui renseigne par sa forme, sur l'équilibre du peuplement de ces espèces.

2.3.2 REGENERATION NATURELLE

La régénération des espèces de bois d'œuvre inscrites sur la liste rouge de l'UICN de 2018, inventoriées, a été évaluée à partir à du calcul du taux de régénération (Tr), selon la formule ci-dessous:

$$Tr = (IR / IS) \times 100$$

Avec Tr le taux de régénération; IR le nombre de tiges de régénération (DHP compris entre 2,5 et 10 cm); IS le nombre de tiges adultes ou semenciers (DHP supérieur ou égal à 10 cm). Cet indice définit le potentiel de régénération des espèces [20]. Suivant la valeur du taux de régénération, trois cas peuvent caractériser le potentiel de régénération d'une espèce:

- Tr > 1000%, signifie que la régénération des espèces est très bonne avec un peuplement équilibré (il y a autant de jeunes plants que d'adultes);
- 100% < Tr < 1000%, traduit une régénération moyenne des espèces;
- Tr < 100%, indique une faible régénération des espèces, avec un peuplement déséquilibré (la densité des jeunes plants est inférieure à celle des adultes).

2.3.3 TEST DE COMPARAISON DE MOYENNES

Les valeurs moyennes des paramètres mesurés (richesse spécifique, densité, aire basale, régénération) dans les trois (03) biotopes du MFYA ont fait l'objet d'analyse statistique. La normalité de la distribution des données a été vérifiée par le test de ShapiroWilk. Il a été suivi des tests d'ANOVA (Analyse de Variance) et de Tukey pour la comparaison des moyennes, quand la distribution des données respecte la normalité. Dans le cas contraire, le test de Kruskal-Wallis suivi du test de Dunn sont effectués pour la comparaison des moyennes. Le niveau de significativité choisi pour ces analyses est de 5 % (P = 0,05).

3 RESULTATS

3.1 COMPOSITION FLORISTIQUE

L'inventaire floristique réalisé dans le MFYA a permis de recenser 24 espèces de bois d'œuvre inscrites sur la liste rouge de l'UICN de 2018 (Tableau 1). Elles sont réparties entre 21 genres, rangées dans 10 familles. Les Malvaceae (07 espèces), les Meliaceae (06 espèces) et les Fabaceae (03 espèces) sont les familles les plus dominantes (Figure 4). Le nombre d'espèces recensées varie de 13 à 24 suivant les biotopes. La forêt secondaire est la plus riche avec 24 espèces, tandis que la forêt reboisée avec 16 espèces et le bloc jachère avec 13 espèces sont les moins fournis (Tableau 2). Les résultats de l'analyse statistique consignés dans le Tableau 2 montrent que les valeurs moyennes de la richesse spécifique des biotopes du MFYA sont significativement différentes ($K=5,998$; $P=0,04$).

En considérant les catégories commerciales des espèces de bois d'œuvre, les 24 espèces inventoriées sont dominées par les espèces principales de première catégorie (P1), à plus de 70 % dans chacun des trois biotopes du massif. Quant aux espèces principales de deuxième catégorie (P2) et troisième catégorie (P3), elles sont faiblement représentées dans le MFYA (Tableau 3).

Concernant le statut de conservation selon l'UICN, l'analyse a montré que les 24 espèces recensées sont réparties en 17 espèces vulnérables (VU), soit 70,83 %; 05 espèces de préoccupation mineure (LC), soit 20,83 %; 01 espèce quasi-menacée (LR/nt) et 01 espèce en danger de disparition (EN), avec chacune 4,17 % (Tableau 3).

Tableau 1. Liste des espèces de bois d'œuvre inscrites sur la liste rouge de l'UICN inventoriées

Espèces	Familles	Catégories commerciales	Statut UICN (2018)
<i>Anopyxis klaineana</i> (Pierre) Engl.	Rhizophoraceae	P2	VU
<i>Berlinia confusa</i> Hoyle	Fabaceae	P2	LC
<i>Bombax breviuspe</i> Sprague	Malvaceae	P1	VU
<i>Ceiba pentandra</i> (Linn.) Gaertn.	Malvaceae	P1	LC
<i>Copaifera salikounda</i> Heck.	Fabaceae	P2	VU
<i>Entandrophragma angolense</i> (Welw.) C. DC.	Meliaceae	P1	VU
<i>Entandrophragma cylindricum</i> (Sprague) Sprague	Meliaceae	P1	VU
<i>Entandrophragma utile</i> (Dawe & Sprague) Sprague	Meliaceae	P1	VU
<i>Eriobroma oblongum</i> (Mast.) Pierre ex A. Chev.	Malvaceae	P2	VU
<i>Guarea cedrata</i> (A. Chev.) Pellegr.	Meliaceae	P1	VU
<i>Heritiera utilis</i> (Sprague) Sprague	Malvaceae	P1	VU
<i>Khaya ivorensis</i> A. Chev.	Meliaceae	P1	VU
<i>Lophira alata</i> Banks ex Gaertn. f.	Ochnaceae	P1	VU
<i>Milicia excelsa</i> (Welw.) C. C. Berg	Moraceae	P1	NT
<i>Milicia regia</i> (A. Chev.) C. C. Berg	Moraceae	P1	VU
<i>Nauclea diderrichii</i> (De Wild. & Th. Durand) Merrill	Rubiaceae	P1	VU
<i>Nesogordonia papperifera</i> (A. Chev.) Cap.	Malvaceae	P1	VU
<i>Parinari excelsa</i> Sabine	Chrysobalanaceae	P3	LC
<i>Parkia bicolor</i> A. Chev.	Fabaceae	P3	LC
<i>Pterygota macrocarpa</i> Schumann	Malvaceae	P1	VU
<i>Terminalia ivorensis</i> A. Chev.	Combretaceae	P1	VU
<i>Tieghemella heckelii</i> (A. Chev.) Pierre ex Dubar	Sapotaceae	P1	EN
<i>Triplochiton scleroxylon</i> K. Schum.	Malvaceae	P1	LC
<i>Turraeanthus africanus</i> (Welw.) Pellegr.	Meliaceae	P1	VU

EN= Espèce en danger de disparition; VU= Espèce vulnérable; NT=Espèce quasi-menacée; LC= Espèce de préoccupation mineure; P1= espèces principales de 1^{ère} catégorie; P2= espèces principales de 2^{ème} catégorie; P3= espèce principale de 3^{ème} catégorie.

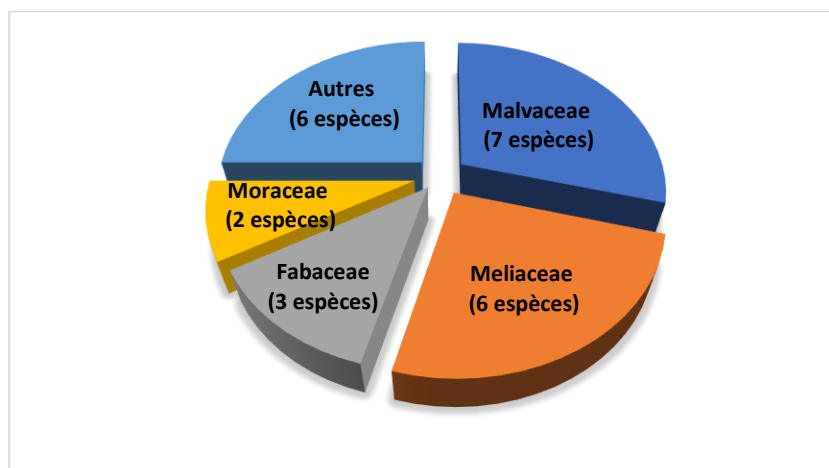


Fig. 4. Spectre de la répartition des familles dominantes

Tableau 2. Récapitulatif des valeurs totales et moyennes des paramètres mesurés

Biotopes	Richesse spécifique		Densité spécifique (tiges/ha)		Aire basale (m ² /ha)		Taux de régénération	
	Valeurs totales	Valeurs moyennes	Valeurs totales	Valeurs moyennes	Valeurs totales	Valeurs moyennes	Valeurs totales	Valeurs moyennes
Forêt secondaire	24	4,95 ± 3,15 ^a	69	68,50 ± 86,82 ^c	65,53	6,55 ± 8,4 ^e	18,1	14,83 ± 20,96 ^g
Forêt reboisée	16	3,9 ± 1,58 ^{ab}	21	20,50 ± 16,28 ^c	22,74	2,27 ± 1,48 ^e	40,48	61,75 ± 69,94 ^h
Jachère	13	3 ± 1,48 ^b	8	8,10 ± 6,56 ^d	5,31	0,53 ± 0,66 ^f	129,62	150,27 ± 108,70 ^h

Tableau 3. Répartition des espèces inventoriées par catégories commerciales et par statut de conservation de l'UICN

Biotopes	Catégories commerciales			Statut UICN (2018)			
	P1	P2	P3	LC	NT	VU	EN
Forêt secondaire	18	4	2	5	1	17	1
Forêt reboisée	13	1	2	3	1	11	1
Jachère	10	1	2	3	1	8	1

3.2 STRUCTURE DU PEUPLEMENT DES ESPECES INVENTORIEES

Le nombre total de tiges adultes des 24 espèces inventoriées dans le MFYA est de 971 pour 30 ha, soit une densité de 32 tiges/ha. En considérant les biotopes, la densité totale la plus élevée a été obtenue dans la forêt secondaire, avec 685 individus, soit 69 tiges/ha. La forêt reboisée compte 205 individus, avec une densité totale de 21 tiges/ha. Le biotope jachère quant à lui, avec 81 individus, a enregistré la densité totale la plus faible, soit 08 tiges/ha. L'aire basale totale des tiges des espèces recensées est de 93,59 m² pour 30 ha, soit 3,11 m²/ha. Les valeurs totales des aires basales sont de 6,55 m²/ha pour la forêt secondaire; 2,27 m²/ha pour la forêt reboisée et 0,53 m²/ha pour la jachère (Tableau 2). Ces valeurs obtenues indiquent que les tiges des 24 espèces inventoriées occupent une importante surface terrière, dans les forêts secondaire et reboisée. Par contre, dans le biotope jachère, les tiges de ces espèces occupent une surface terrière moindre. Les résultats de l'analyse statistique montrent que les valeurs moyennes de la densité ($K=13,028$; $P=0,001$) et de l'aire basale ($K=15,155$; $P=0,001$) des biotopes forêt secondaire et forêt reboisée sont significativement différentes de celles de la jachère (Tableau 2).

Les formes des histogrammes de distribution des tiges par classes de diamètre, des 24 espèces de bois d'œuvre inscrites sur la liste rouge de l'UICN, recensées varient d'un biotope à un autre. Dans la forêt secondaire et la jachère, on note une allure en forme de « J inversé » des histogrammes. Par contre, dans la forêt reboisée, l'allure de la distribution obtenue a la forme d'une cloche, donc différente de celles des deux autres biotopes (Figure 5).

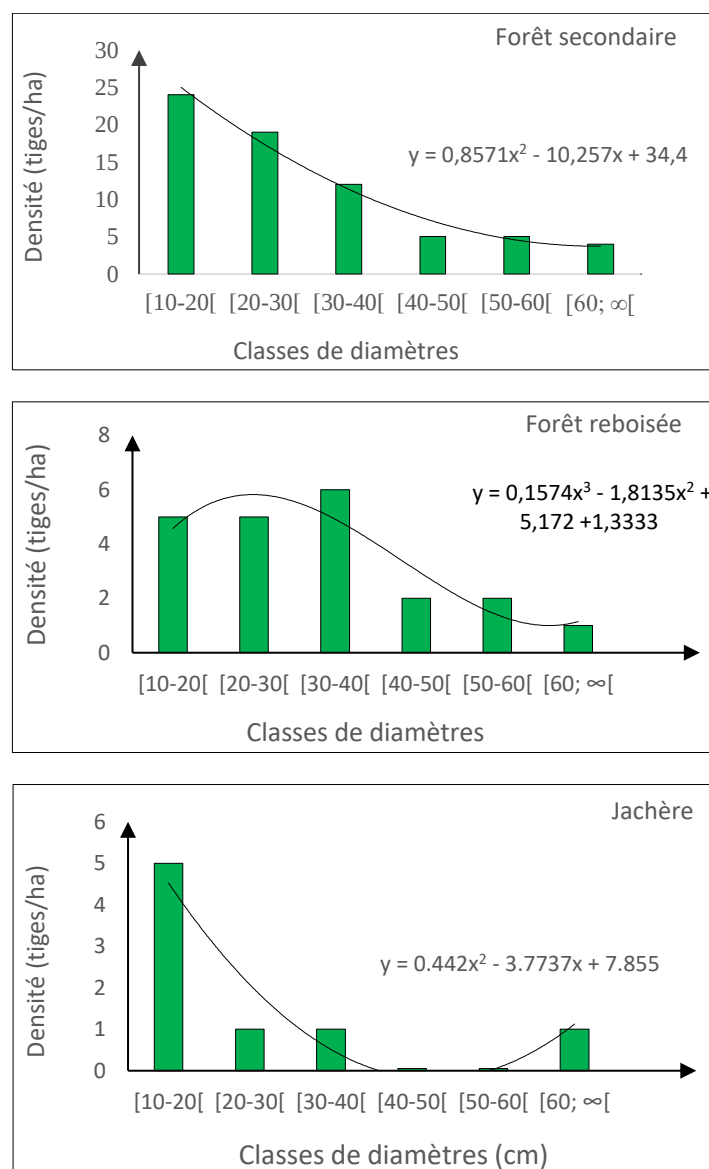


Fig. 5. Histogrammes de distribution des tiges par classes de diamètre des espèces inventoriées

3.3 REGENERATION DES ESPECES INVENTORIEES

Les valeurs totales du taux de régénération des 24 espèces inventoriées, dans les trois biotopes du MFYA sont de 18,10% pour la forêt secondaire; 40,48% pour la forêt reboisée et 129,62% pour la jachère. Ces valeurs totales montrent que les espèces de bois d'œuvre inscrites sur la liste rouge de l'UICN, inventoriées ont un potentiel de régénération moyen dans le biotope jachère et relativement faible dans les deux autres biotopes (forêt secondaire et forêt reboisée). Le tableau 2 montre que les valeurs moyennes du taux de régénération de la jachère et de la forêt reboisée, sont significativement différentes de celle de la forêt secondaire ($K = 20,595$; $P < 0,0001$).

4 DISCUSSION

L'analyse de la composition floristique a montré que dans le MFYA, les richesses spécifiques obtenues dans les forêts secondaire et reboisée sont plus élevées que celle enregistrée dans le bloc jachère. En effet, les deux premiers biotopes ont fait l'objet d'enrichissement et de reboisement, lors des différents travaux d'aménagement du massif, dans les années 1930 à 1980 [21]. La forte présence des espèces de bois d'œuvre inscrites sur la liste rouge de l'UICN, dans la forêt secondaire pourrait s'expliquer par le fait que ce biotope, contrairement aux deux autres, subit moins de pressions [1]. Selon cet auteur, la forêt secondaire constitue une zone de protection et de refuge pour ces espèces. La faible présence des espèces de bois d'œuvre

inscrites sur la liste rouge de l'UICN inventoriées, dans le biotope jachère serait liée aux nombreuses activités anthropiques qu'il subit, notamment les activités agricoles et les coupes pour la production de charbon de bois et de bois d'énergie [10].

Les plus fortes densités des tiges des espèces inventoriées, dans les forêts secondaire et reboisée seraient liées aux travaux de reboisement, d'enrichissement et d'expérimentation réalisés dans ces deux biotopes [22], [23]. En effet, Dans la forêt secondaire, une réserve botanique de 528 ha a été créée dans sa partie Nord en 1947 et 354 ha de ce biotope ont été concédés à l'ex-CTFT (Centre Technique Forestier Tropical) pour y mener des travaux expérimentaux sur le comportement des espèces de forêt naturelle en plantations [22]. Toutes ces actions ont conduit les gestionnaires du MFYA à accorder une importance particulière au biotope forêt secondaire, d'où sa forte densité et sa bonne conservation par rapport aux deux autres. Les valeurs élevées d'aire basale dans la forêt secondaire est imputable à l'abondance des espèces recensées à l'intérieur de celle-ci et à l'importance de leurs diamètres. En effet, [24], au cours de ses travaux, dans la Réserve Spéciale de Bezà Mahafaly à Madagascar, a montré qu'un milieu écologique a une forte valeur d'aire basale, lorsqu'il recèle un nombre important d'individus de gros diamètre. Cette observation a été également soulignée par [25], dans la forêt classée de Bossématié (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) et par [26], dans l'Arboretum du Centre National de Floristique de l'Université Félix HOUPOUET-BOIGNY. L'installation clandestine de cultures agricoles pourrait justifier la faible densité des tiges des espèces inventoriées, dans le biotope jachère. En effet, l'accroissement considérable de la masse paysanne autour du MFYA a occasionné dans le biotope jachère, l'infiltration clandestine de nombreux paysans qui y ont créé des plantations agricoles [23]. Ces pressions anthropiques entraînent inévitablement la rareté des tiges de gros diamètre, d'où les faibles valeurs d'aire basale enregistrées. Les distributions diamétriques en « J inversé » obtenues pour la forêt secondaire et la jachère montrent que dans ces biotopes, le peuplement des espèces inventoriées est plus ou moins équilibré, malgré les pressions subies. Selon [27], la distribution des tiges par classes de diamètre, en forme de « J inversé » est l'une des caractéristiques typiques de peuplements stables, susceptibles de se renouveler régulièrement dans les forêts denses tropicales. Cependant, la structure diamétrique en « cloche » obtenue pour la forêt reboisée traduit une perturbation certaine du peuplement des espèces. Pour [19], la structure diamétrique en forme de cloche observée pour un peuplement donné indique une perturbation et un renouvellement irrégulier de ce peuplement.

L'évaluation du potentiel de régénération des espèces inventoriées a montré que le taux élevé de régénération a été enregistré par le biotope jachère. Cela implique qu'on y rencontre plus de tiges de régénération que de tiges adultes des espèces inventoriées. En effet, les tiges de régénération ont trouvé dans le biotope jachère des conditions favorables à leur installation et à leur développement. Ces conditions pourraient être liées au degré élevé de perturbation dudit biotope, malgré la structure diamétrique en "J inversé obtenue". Ce constat confirme celui fait [28], qui, dans la forêt de Gribé, au Sud-Est du Cameroun, ont révélé un bon potentiel de régénération de *Ricinodendron heudelotii* (une espèce de bois d'œuvre de la flore ivoirienne). Pour ces auteurs, le bon potentiel de régénération de *Ricinodendron heudelotii* est imputable aux perturbations forestières, vu le caractère héliophile de l'espèce. Dans le biotope jachère du MFYA, les nombreuses trouées créées par les perturbations forestières assurent la survie des tiges de régénération des espèces inventoriées. Les faibles taux de régénération enregistrés par les forêts secondaire et reboisée pourraient s'expliquer par la concurrence entre les tiges de régénération des espèces recensées et toutes les autres espèces végétales présentes. Cette concurrence se traduit par les compétitions intra et/ou interspécifiques, notamment pour la ressource en eau, en nutriments, en espace et une concurrence pour la lumière [29], [30].

5 CONCLUSION

24 espèces de bois d'œuvre inscrites sur la liste rouge de l'UICN de 2018 ont été inventoriées dans le MFYA. Elles sont réparties entre 21 genres, rangées dans 10 familles et dominées par les Malvaceae, les Meliaceae et les Fabaceae. Au sujet des catégories commerciales, l'analyse a montré que les espèces principales de première catégorie (P1) sont abondantes dans l'ensemble du MFYA, tandis que les espèces principales de deuxième et troisième catégorie (P2 et P3) y sont faiblement représentées. Les 24 espèces recensées se répartissent en 17 espèces vulnérables, 05 espèces de préoccupation mineure, 01 espèce quasi-menacée et 01 espèce en danger de disparition. L'analyse de la structure a montré que dans les biotopes forêt secondaire et jachère, le peuplement des 24 espèces inventoriées est plus ou moins équilibré, en dépit des pressions anthropiques. Dans le biotope forêt reboisée, le peuplement de ces espèces inventoriées est par contre perturbé et déséquilibré. L'évaluation du potentiel de régénération a révélé que les 24 espèces inventoriées ont du mal à se régénérer dans les biotopes forêt secondaire et forêt reboisée. Dans ces formations, la régénération des espèces est gênée par la canopée, qui est plus fermée et les phénomènes de compétition intra et/ou interspécifique. Cependant, dans le biotope jachère, les 24 espèces inventoriées ont un bon potentiel de régénération.

REMERCIEMENTS

Nous remercions les autorités de l'Université Félix HOUPOUËT-BOIGNY, à travers le Laboratoire des Milieux Naturels et Conservation de la Biodiversité, pour avoir initié la collaboration entre la SODEFOR et ladite Université. Nous adressons aussi nos remerciements aux Responsables de la SODEFOR de nous avoir permis et aidé à la Collecte des données dans le Massif Forestier de Yapo-Abbé.

REFERENCES

- [1] D. Konan, «Étude de la dynamique floristique, structurale et du potentiel germinatif du stock semencier du sol de la forêt classée de Yapo Abbé: contribution pour une gestion durable des forêts classées de la Côte d'Ivoire», Thèse de Doctorat, UFR des Sciences de la Nature, Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire, 217p, 2016.
- [2] N. F. Tuo, K. J. Koffi, A. F. Kouassi, M. Koné, A. Bakayoko, J. Bogaert, «Etude de la diversité, de l'endémisme et de la distribution spatiale des Rubiaceae de Côte d'Ivoire», *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 11, n°2, pp. 777-797, 2017.
- [3] N. J. Kassi, «Successions secondaires post-culturelles en forêt dense semi-décidue (Côte d'Ivoire): nature, structure et organisation fonctionnelle de la végétation», Thèse de Doctorat, Université de Picardie Jules Verne d'Amiens, France, 212 p, 2006.
- [4] A. E. N'Guessan, «Dynamique de la végétation et facteurs de reconstitution de la biomasse dans les forêts secondaires: cas de la forêt classée d'Agbo 1 (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)», Thèse de Doctorat, UFR Biosciences, Université Félix HOUPOUËT-BOIGNY, Abidjan, Côte d'Ivoire, 149 p, 2018.
- [5] D. Konan, A. Bakayoko, F. H. Tra Bi, B. G. A. Bitignon, and S. C. Piba, «Dynamisme de la Structure diamétrique du peuplement ligneux des différents biotopes de la forêt classée de Yapo-Abbé, Sud de la Côte d'Ivoire», *Journal of Applied Biosciences*, vol. 94, pp. 8869-8879, 2015.
- [6] S. F. P. Ouattara, «Caractérisation et stock de carbone des peuplements des espèces de bois d'œuvre menacées d'extinction du massif forestier de Yapo-abbé (côte d'ivoire)», Thèse de Doctorat de l'Université Félix HOUPOUËT-BOIGNY, UFR Biosciences, Abidjan, Côte d'Ivoire, 129 p, 2021.
- [7] S. F. P. Ouattara, «Diversité et densité des espèces de bois d'œuvre inscrites sur la liste rouge de l'UICN, dans l'Arboretum du Centre National de Floristique de l'Université Félix HOUPOUËT-BOIGNY (Côte d'Ivoire)», Mémoire de Master, UFR Biosciences, Abidjan, Côte d'Ivoire, 60 p, 2017.
- [8] K. Kouadio, N. H. Dibi, K. S. B. N'goran, and S. F. P. Ouattara, «Diversité des espèces de bois d'œuvre dans l'Arboretum du Centre National de Floristique de l'Université Félix HOUPOUËT-BOIGNY (Côte d'Ivoire)», *Revue de l'environnement et de la Biodiversité-pasres*, vol. 3, n°1, pp. 14-26, 2018.
- [9] F. Touré, «Contribution de la Télédétection et des SIG dans l'étude de la dynamique des îlots de forêt dense dans la Forêt classée des Monts Kouffé et sa périphérie au Bénin entre (1986-2006)», Mémoire de DESS en Production et gestion de l'information géographique, RECTAS, Campus Universitaire Obafemi Awolowollé-Ifè, Nigéria, 69 p, 2010.
- [10] S. F. P. Ouattara, K. Kouadio, and D. Soro, «Diversité des espèces de bois d'œuvre menacées de disparition de la flore de la Côte d'Ivoire, dans le Massif Forestier Yapo-Abbé», *European Scientific Journal*, vol. 15, n°36, pp. 213-229, 2019.
- [11] SODEXAM, Données météorologiques de la région de l'Agnéby-Tiassa, 2016.
- [12] Guillaumet J. L., and Adjanohoun. E., *La végétation de la Côte d'Ivoire*, In: Le Milieu Naturel de la Côte d'Ivoire, *Mémoire ORSTOM*, Paris, France, pp. 161-262. 1971.
- [13] Hawthorne D. W., Guide de terrain pour les arbres des forêts denses de la Côte d'Ivoire et pays limitrophes, Ecosyn., Wageningen (Hollande), 276 p, 1996.
- [14] APG IV, «An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants», *Botanical Journal of the Linnean Society*, vol. 181, pp. 1-20. 2016.
- [15] L. Aké-Assi, Flore de la Côte d'Ivoire 1, Catalogue, systématique, biogéographie et écologie. Conservatoire et jardin botanique de Genève, Suisse, Boissiera, tome 1, 396 p, 2001.
- [16] L. Aké-Assi, Flore de la Côte d'Ivoire 2, catalogue, systématique, biogéographie et écologie. Conservatoire et Jardin Botanique de Genève, Suisse, Boissiera, tome 2, 441p, 2002.
- [17] K. Kouadio, K. E. Kouassi, N. F. Kouamé, and D. Traoré, «Évaluation des effets de l'éclaircie sélective, par dévitalisation, sur la croissance en diamètre des essences principales dans la forêt classée de Bossématié (Côte d'Ivoire)», *Agronomie Africaine*, vol. 19, n°1, pp. 1-12, 2007.
- [18] B. Rollet, «La régénération naturelle en forêt dense humide sempervirente de la plaine en Guyane Vénézuélienne», *Bois et Forêts des Tropiques*, vol. 124, pp. 19-38, 1979.

- [19] E. R. Jiagho, «Flore et végétation ligneuse à la périphérie du Parc National de Waza (Cameroun): Dynamique et implications pour une meilleure gestion». Thèse de Doctorat, UFR Sciences humaines et sociales, Université de Yaoundé 1, Yaoundé, Cameroun, 309 p, 2018.
- [20] N. J. B. Mélingui, H. Agoni, P. A. Claude, and L. Kono, «Potentiel de Régénération Naturelle de quelques produits forestiers non ligneux prioritaires dans le Bassin de production d'Akom II.
- [21] Sud-Cameroun)», *World Wide Journal of Multidisciplinary Research and Development*, vol. 4, n°2, pp. 214-224, 2018.
- [22] S. C. Piba, F. H. Tra Bi, D. Konan, B. Blé, and A. Bakayoko, «Inventaire et disponibilité des plantes médicinales dans la Forêt Classée de Yapo-Abbé», *European Scientific Journal*, vol. 11 n°24, pp. 161-181, 2015.
- [23] SODEFOR, Plan d'aménagement de la forêt classée de Yapo et Abbé: 1999 - 2023, SODEFOR, Abidjan, Côte d'Ivoire, 141 p, 1999.
- [24] S. F. P. Ouattara, K. Kouadio, and K. Yao, «Estimation du stock de carbone des espèces de bois d'œuvre menacées du Massif Forestier de Yapo-abbé (Côte d'Ivoire)», *Agronomie Africaine*, vol. 33, n° 3, pp. 293 – 304, 2021.
- [25] R. Ramananjatovo, «Étude structurale et écologique de la régénération naturelle de la flore dans deux zones à différents degrés de perturbation dans la Réserve Spéciale de Bezà Mahafaly ». Mémoire de fin d'études, Diplôme d'Ingénieur, Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, Antananarivo, Madagascar, 80 p, 2013.
- [26] K. Kouadio, «Études de la flore, de la végétation et de l'impact de l'éclaircie sélective par dévitalisation, sur les essences principales de la forêt classée de Bossématié, Est de la Côte d'Ivoire», Thèse de Doctorat, UFR Biosciences, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 191 p, 2007.
- [27] K. B. Kpangui, «Apport des Systèmes d'Informations Géographiques à l'Etude de la diversité spécifique de l'Arboretum du Centre National de Floristique (Cote d'Ivoire) ». Mémoire de DEA d'Écologie Tropicale (Option Végétale), UFR Biosciences, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 63p, 2009.
- [28] K. Adjonou, R. Bellefontaine, and K. Kokou, «Les forêts claires du Parc national OtiKéran au Nord du Togo: Structure, dynamique et impacts des modifications climatiques récentes». *Sécheresse*, vol. 20, pp. 1-10, 2009.
- [29] F. E. Fongnzossie, T. M. Ngansop, L. Zapfack, V. A. Kemeuze, D. J. Sonwa, G.M. Nguena, and B. A. Nkongmeneck, «Density and natural regeneration potential of selected Non Timber forest products species in the semi-deciduous rainforest of Southeastern Cameroon», *African Study Monographs*, vol. 49, pp. 69-90, 2014.
- [30] M. Rabezanahary, «Etude de la dynamique de régénération après exploitation au niveau de deux sites de transfert de gestion de ressources naturelles renouvelable, dans la Commune Rurale de Didy», Mémoire de fin d'études, ESSA-Forêts, Madagascar, 58p, 2011.
- [31] S. Guitet, O. Brunaux, and S. Traissac, *Sylviculture pour la production de bois d'œuvre des Forêts du Nord de la Guyane « Etat des connaissances et recommandations »*, Rapport scientifique, Office National des Forêts, Direction Régionale de Guyane, France, 104 p, 2014.

