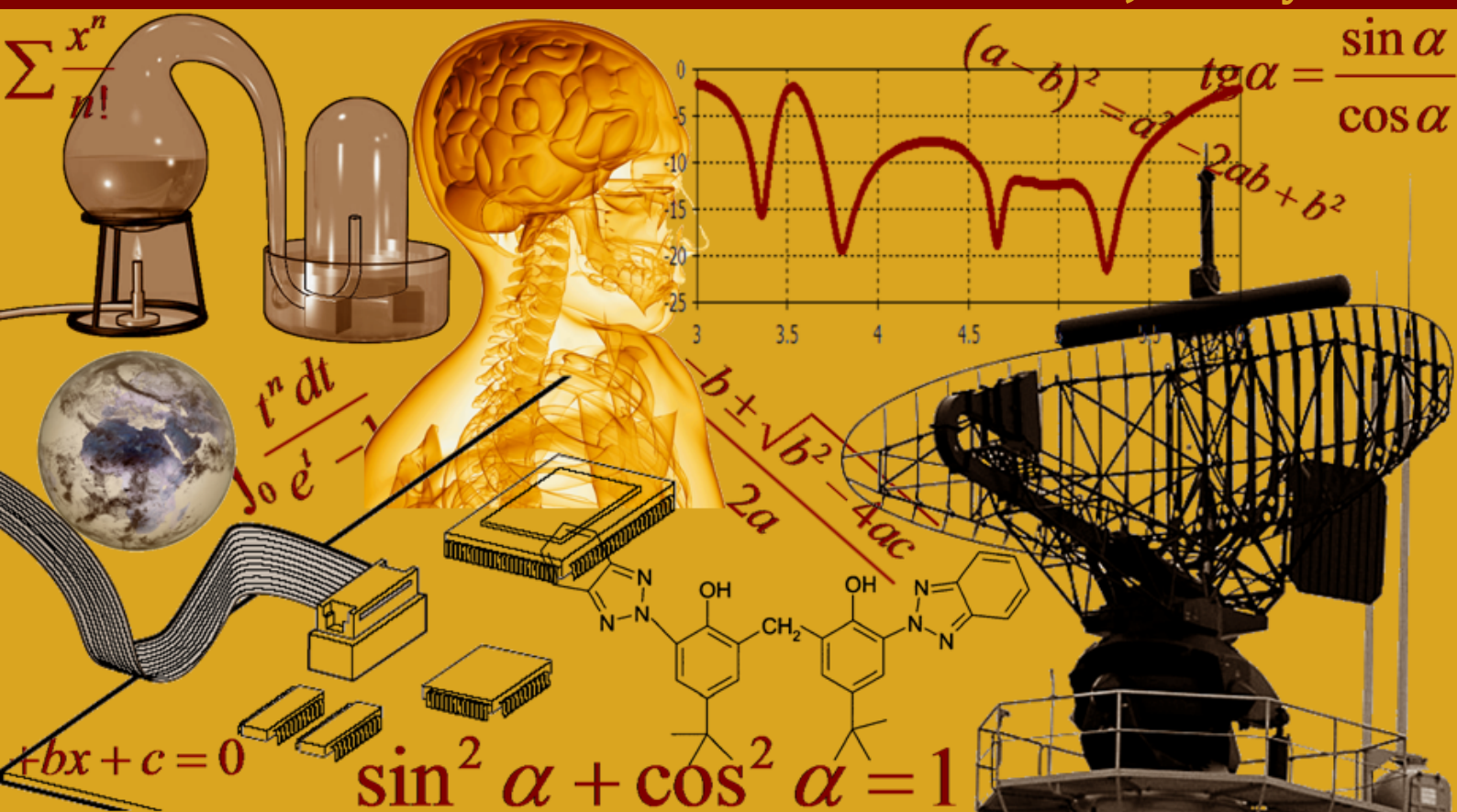


INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATION AND SCIENTIFIC RESEARCH

Vol. 82 N. 2 January 2026



International Peer Reviewed Monthly Journal



International Journal of Innovation and Scientific Research

International Journal of Innovation and Scientific Research (ISSN: 2336-0046) is an open access, specialized, peer-reviewed, and interdisciplinary journal that focuses on research, development and application within the fields of innovation, engineering, science and technology. Published four times per year in English, French, Spanish and Arabic, it tries to give its contribution for enhancement of research studies.

All research articles, review articles, short communications and technical notes are sent for blind peer review, with a very fast and without delay review procedure (within approximately two weeks of submission) thanks to the joint efforts of Editorial Board and Advisory Board. The acceptance rate of the journal is 75%.

Contributions must be original, not previously or simultaneously published elsewhere. 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

K. Messaoudi, Hochschule für Bankwirtschaft, Germany
Sundar Balasubramanian, Medical University of South Carolina, USA
Ujwal Patil, University of New Orleans, USA
Avdhoot Walunj, National Institute of Technology Karnataka, India
Rehan Jamil, Yunnan Normal University, China
Sankaranarayanan Seetharaman, National University of Singapore, Singapore
Fairouz Benahmed, University of Connecticut Health Center, USA
Achmad Choerudin, ST.,SE.,MM., Academy Technology of Adhi Unggul Bhirawa, Indonesia
Mohammad Ali Shariati, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Iran
Md Ramim Tanver Rahman, Jiangnan University, China
Rasha Khalil Al-Saad, Veterinary Medicine College, Iraq
Neil L. Egloso, Palompon Institute of Technology, Philippines
Sanjay Sharma, Roorkee Engineering & Management Technology Institute, India
Ahmed Nabile Emam, National Research Center (NRC), Egypt
Md. Arif Hossain Jewel, Rural Development Academy, Bangladesh
N. Thangadurai, Jayalakshmi Institute of Technology, India
Urmila Shrawankar, G H Rasoni College of Engineering, India
Goutam Banerjee, Visva-Bharati University, India
Santosh Kumar Mishra, S. N. D. T. Women's University, India
Anupam Kumar, Ashoka Institute of Technology & Management, India

Table of Contents

Resistance to COVID-19 Vaccination During Early Phases in USA	57-63
<i>Bharath Reddy</i>	
Shoulder Pain Intensity in Wheelchair Basketball Players in Benin: A Prospective Observational Study	64-71
<i>Oscar Dagbémabou Oladouni Azé, Florentine Kouglo, Delphine Ouédraogo, Marc Charbel Gnonhossou, and Barnabé Akplogan</i>	
Valorisation de la tige de sissongo (<i>Pennisetum purpureum</i>) pour la production des briques de terre compressées (BTC) dans l'arrondissement de Yabassi, Département du Nkam, Région du Littoral au Cameroun	72-92
<i>Amadou MOUNDOM, EFON Boniface, NDJEUKOUA TCHEBDA Léolain Rostand, BAANA Abouar, MELENDE ABATE David Aymar, MANJIA Marcelline Blanche, François NGAPGUE, Thomas TAMO TATIETSE, and Chrispin Pettang</i>	
Assessment of species richness and relative abundance of medium and large mammals within and outside of Moukalaba-Doudou National Park, Gabon	93-100
<i>Akomo-Okoue Etienne Francois, Mindonga-Nguelet Fred Loique, and Nguema-Ngomo Quentin</i>	
Évaluation des teneurs en alumine et en silice de la bauxite de Sangarédi et leur impact sur la qualité des produits destinés à l'export, République de Guinée	101-113
<i>Ibrahima Kalil Kourouma, Alain Gbilimou, Soriba Bangoura, and Oumou Hawa Bah</i>	

Resistance to COVID-19 Vaccination During Early Phases in USA

Bharath Reddy

Process Automation, Schneider-Electric Inc, Lake Forest, CA, USA

Copyright © 2026 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: COVID-19 time is a great time to assess human sentiment when it comes to resistance that was observed to get vaccine administered in USA. There was large amount of hesitancy bordering on hate to get COVID-19 vaccine and it has blown into a public health challenge. In this paper, we investigate the resistance that was observed during the initial stages on the Vaccine administration in USA from 2021. We will see there was a large demographic group leading into the year indicating that they will resist to get a vaccine, and they remained unchanged for large period of the that year. To every one surprise, the largest group which resisted the vaccine was the age group between 18-24 (27%) and when it comes to race, Blacks resisted the most (20%). Also, we also saw there was more resistance from the east coast with the west coast more inclined to get the vaccine. In this paper, we will show why there was this resistance and try to make sense why the efficacy of the vaccine took such a long time to get the epidemic and population agreeable to vaccine.

KEYWORDS: COVID-19, vaccine, demographic, resistance.

1 INTRODUCTION

During the early months of 2021, the US food and drug safety administration (FDA) approved three vaccines to be administered to the public to stem the death and eradicate the SARS-CoV-2 infection, which had now taken millions of people to the grave worldwide. These three vaccines included two mRNA vaccines produced by Pfizer and my company's (Moderna), and one viral vector vaccine produced by Johnson and Johnson. All these three vaccines were thorough vetted by a series of drug tests and met the safety and effectiveness requirements bar set by the department to obtain its emergency use authorization for COVID-19. Despite the FDA over stemming approach in educating the public on the safety of the vaccine and its efficacy, with little information on the side effects, the vaccine efficacy remained a significant hurdle in bringing the people to get administered and bringing the pandemic to an end sooner. A small number of in fact and older people dying after the initial first shot from the vaccines did not help.

Addressing this resistance to the COVID-19 vaccine required large national communication steps that were not only tailored to regions but different demographics to address their own unique concerns. Data analysis played an important role in informing the department to strategize a method to reach every nook and corner of the country. To support this, both state and local communication and outreach efforts were explored. This paper looks back to see how the strategy panned out to overcome the initial resistance among the different geographic areas and demographics groups and how the time changed quickly in favor of vaccine administration.

2 BACKGROUND

Resistance to vaccine administration is defined as the state or a belief and a behaviour bordering on confusion whether to or not to accept vaccination [1]. This resistance ranges from anger, hate, confusion and though purpose to validate oneself from complete refusal to complete acceptance [2]. Resistance can lead individual to outright reject or delay or adjust vaccination schedules to see the efficacy of the vaccine, or at times vaccinate partially or decline with steadfastness [3]. Vaccine resistance is common and is not reserved for COVID-19 and is seen as a n important issue for all pre-existing infectious diseases worldwide.

It amounts directly to declining rates of vaccination in developing countries than developed countries and at times threaten this herd mentality if the environment is conducive [4]. In addition to other mitigating factors administration take around the world, administering the vaccine during the outbreak is a monumental challenge in reducing illness, spread of epidemic, and deaths. Hence managing the vaccine administration plays an important role in controlling the spread of epidemics.

Overcoming this resistance to vaccine administration is key to ensuring vaccine reaches enough population to reduce spread, transmission of SARS-CoV-2 and end the COVID-19 pandemic. In the later part of 2020, multiple COVID-19 vaccines were in the last phases of clinical trials not only in USA but in UK [5], showing great promises in their initial phases. During this stage, many Americans and people around the world were surprised and appalled at the speed at time the FDA were pushing the clinical trials and expressed outright hesitancy around these potential vaccines. Their reasoning was, for a vaccine to come about, it would take more testing for larger sample and time, to get it right. They also expressed their resistance in the potential side effects and a total mistrust in the government oversight to ensure safety and were covered that the vaccine is just in too soon and were used a testing mole [5]. This analysis paper shows how vaccine resistance evolved in 2021 during a 10-month period as vaccines became more available to segments of the public. Controlling, mitigating, educating, and managing vaccine administration is a monumental effort and it takes a lot to reduce resistance. Hence the importance of vaccine administration cannot be neglected.

3 DATA AND METHODS USED

We look at the trends in the vaccine hesitancy using the US census Bureau's Household Pulse Survey (HPS) and our internal survey of the vaccine adoption. We look at the resistance rate at the time from all parts of the country and local levels using the data from American Community Survey (ACS). The HPS is a national data and includes information on the US resident's vaccination for COVID-19, intentions to receive Vaccine in the coming days when available, reasons for resistance, sociodemographic, geographic, basically including state, county, city and zip code, age, gender, and ethnicity. We used this data from the HPS from January 2021 to October, 2021. The survey sampled are approximately 3.58 million households and response rate of 7% overall [6]. American Community survey is a different ball game, as it provides valuable information on the sociodemographic and geographic information, which when used in tandem with our internal data along with region, state, and county level, as well as the data in the public domain which lists the population along zip codes, which areas had more populations more than 50000 and others. ACS data along with the response data of nearly 7 million in the course of time was used in this study [7]. The HPS data contained questionnaire, along the lines of "Once a vaccine to prevent COVID-19 is available to you, would you...get a vaccine?", which provides the following options: 1) "definitely get a vaccine"; 2) "probably get a vaccine"; 3) "probably not get a vaccine"; 4) "definitely not get a vaccine." [7], [18], [19], [23], [24], [27]. In this study we used 'resistance' in the response indicating whether a person would 'probably not' or "definitely not" receive the COVID-19 vaccine going forward. Here, the strong response like "definitely not" is used to indicate that a person would strongly not consider getting the vaccine when it is available.

In the data we received, individuals who responded with 'yes' or 'no' to have vaccine were included and people whose response were neither 'yes' or 'no' were excluded. The people whose response was 'yes' to the questionnaire, 'have you already received a vaccine' were treated as 'not resistant' and who responded with 'definitely' and 'probably' were also treated or counted as 'not resistant'. People who responded to 'no' to having received the COVID-19 vaccine to who said they do not intend to receive all required dosages, the questionnaire asked, "Which of the following, if any, are reasons that you [only probably will /probably won't/definitely won't], [get a COVID-19 vaccine/won't receive all required doses of a COVID-19 vaccine] ?". Our internal analysis was done in a step -by step fashion linearly, first using the HPS data, we used regression to analyse vaccine resistance using the sociodemographic and information regarding other data like race, age, gender, education, marital status, income, state, zip code. We later used regression from the HPS analysis data done in the previous step to the data gathered from ACS to predict vaccine resistance rates for everyone. We then average it out to predict the values by geographic, area-specific resistance rates.

Patient data was collected from NIMHANS main central system, which already as a file of every teen with down syndrome for other clinical evaluation and procedures at our facility. The evaluation includes Neuropsychiatry units, Paediatric, behavioural information between January 2023 to present. There were some children who were withdrawn from the facility during this period, those samples are not considered in this study. At NIMHANS, all patients would go through paediatric and neuropsychological evaluation although the diagnosis might have occurred at other private facility or hospital. During the initial evaluations, NIMHANS procedure dictates a patient's parents / caregivers complete a thorough measures, medications, procedures, diet, and other information including the sleep patterns using a sleep, psychopathological questionnaires on the teen. Due to this process in place, a vast amount of data is collected and fed into the NIMHANS main computer system, which gives a dashboard view of all identified data that would be analysed or analysed during time. All parents as part of Government of India law are required to sing a written consent for data use for research purposes and privacy statement ensures that data is kept confidential and within the government dictated terms and use.

4 RESULTS

4.1 RESULTS BASED ON TIME

We first look at the resistance level of all adults (age > 18) between January, 2021 and October 2021. People who responded with 'definitely not' and 'probably not' receive a vaccine were regarded as hostile, decreased considerably during this period (p-value < 0.001). It is interesting to note that, this dramatic change in the response to vaccine resistance is mainly due to people who had earlier responded with 'probably not' had changed their mind and were more receptive to vaccine than those people who had responded with 'definitely

not'. The percentage of people who jumped from 'definitely not' to actively receiving vaccine did not change much, clearly pointing that these respondents were stubborn on not getting the vaccine come what way. This is shown in Figure 1.

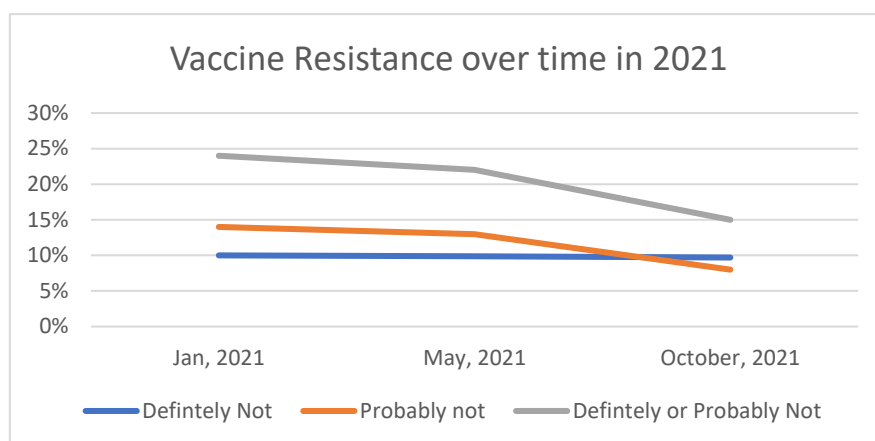


Fig. 1. vaccine resistance over time in 2021

4.2 RESULTS BASED ON DEMOGRAPHICS.

In this section, we investigate the resistance rate based on the demographic data in the same period. Table 1 summarizes the results. From the data, we see there is bit a variation when data was looked closely by gender, age, race, and college education. We see from the results that women were more resistant than men and surprisingly resistance was less for people whose age was greater than 65 and highest recorded resistance in the age group of 25 and above. It also pointed that Asians had the highest resistance to vaccine amongst all races while people without college education also exhibited the same emotion / preference to vaccine. Overtime the resistance to vaccine decreased considerably amongst all gender/ race / education wise too from 25% to 15% by gender, education wise, it dropped from high 20's to high teen percentage wise. Looking at the race subsection, we see that Asians embraced the vaccine over time along with Blacks, the resistance level dropped from high 30's to low 20s.

Table 1. Resistance based on demography

Demography	January, 2021	October, 2021
Male	23%	15%
Female	26%	15%
Age: 18-24	27%	19%
Age: 25-39	31%	24%
Age:40-54	26%	18%
Age: 55-64	17%	12%
Age: >65	13%	6%
White	23%	14%
Black	37%	19%
Asian	7%	5%
Hispanic	18%	11%
Rest	36%	25%
College White	28%	21%
Non-College White	11%	7%
College Black	29%	10%
Non-College Black	38%	23%
College Asian	7%	4%
Non-college Asian	11%	5%
College Hispanic	21%	14%
Non-College Hispanic	19%	13%

Table 2. Demographic score

Demographic	January, 2021	October, 2021
Age		
18-24	0.05	0.04
25-39	1.33	1.45
40-54	1.01	1.04
55-64	0.58	0.54
>65	0.32	0.26
gender		
male	0.79	0.96
Female	1.02	0.87
Race		
White	0.88	0.78
Black	1.287	0.96
Asian	0.42	0.26
Hispanic	0.58	0.42
Education		
High School	0.93	0.88
College	0.68	0.68
Higher	0.23	0.21
Marital Status		
Married	1.03	1.01
Divorced/ Widowed/separated	1.4	1.11
Single	1	0.75
Income		
< 25k	0.87	0.89
25k - 35k	0.89	0.94
35k - 50k	0.81	1.02
50k - 75k	0.82	0.88
75k-100k	0.95	0.98
100k - 150k	0.82	0.83
150k - 200k	0.62	0.82
>200k	0.43	0.66

There was substantial variation in resistance based on the geographical location of the responder. From the results we saw there was less resistance from west coast and in the northeast like new England. Regions like the bible belt and south showed higher resistance to vaccine administration. From an economical point of view coupled with age group, we saw that there was greater resistance from younger uneducated or high school educated responders than college or higher educated people.

Results based on the questionnaire were also looked upon, we saw there was a lot of anxiety on the safety of the vaccine. More than 25 percent of them believe they did not need them, and a higher percentage did not trust the vaccines or the government, citing vaccines would take longer time to mature to be administered. A small percentage of the people wanted to wait, or said, 'I plan to wait' or 'Do not know if vaccine work'. This percentage decreased over time as the initial administered vaccines showed good results and people started trusting both the vaccine and the government. While there was high single digit percentage of people still hesitant to take the vaccine citing 'I do not believe I need', this percentage are also ebbed over time. Surprisingly the number of people who vehemently resisted the vaccine citing 'I do not trust' remained the same.

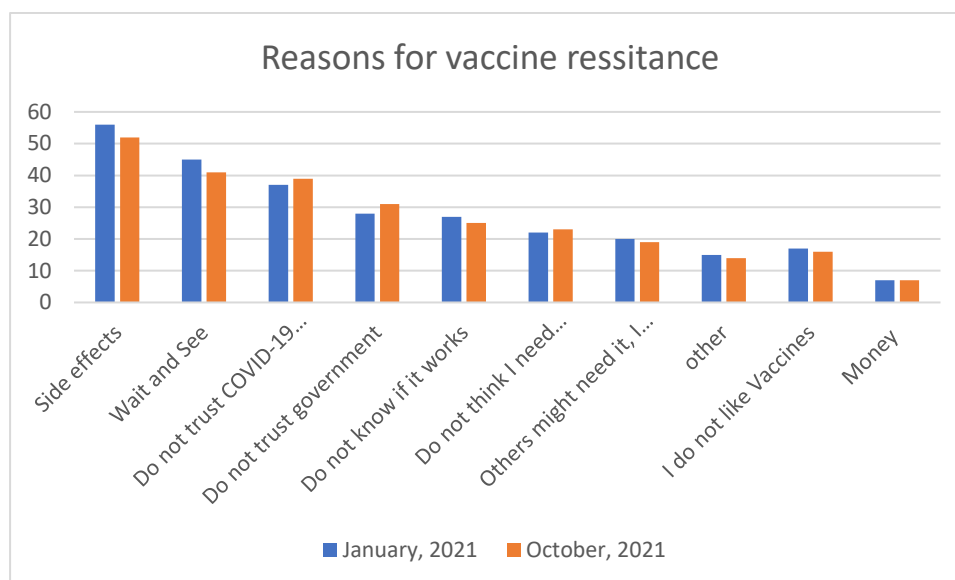


Fig. 2. Reasons for resistance

Figure 2 shows the reasons for resistance for vaccine administration. Most of the reasons that were cited in January, 2021 like side effects, wait and see, do not trust COVID-19, trust in efficacy, do not like vaccines, for all of the above reasons, the resistance came down over time in October, 2021. Surprisingly, 'Do not know if it works' and 'Do not think I need them' were the reasons people still held back from getting vaccine treatment. Other reasons like money did not change much over time.

5 DISCUSSION

When the vaccines started getting administered, millions of millions of people here in USA and across the globe were vaccinated. Here in USA, there was still resistance to the vaccination despite the strong safety and efficacy data pouring each day and FDA openly coming on national TVs saying the same. The resistance to anything new is well known, however, when it comes to vaccine it gets really complicated. There are many factors ranging from history of bad experience, social, peer influence, political views which was seen strongly here in USA and others including vaccine brands. In this study, we saw there was resistance in all races, educated or not, and in different income groups.

There are other studies done to see the resistance to vaccines among different age and income groups. Beaumont Foundation found that there was a lot of resistance from the groups living in rural areas and who were black and republican [8], [18], [19], [20]. Over time, the resistance amongst this group gradually decreased. The foundation saw that there was a significant drop in resistance to vaccine among black and Hispanic groups [9], [18], [19], [20].

However, resistance did remain the same among other demographics [10], [11], [21]. A new study found there was a greater willingness to get vaccinated from non-Hispanic black adults in the later stages of 2021 [12], [13]. The percentage of people who either indicated that they would "definitely not" get a COVID-19 vaccine, or responded by "strongly hesitant," did not change considerably over time. A study done by Axios/Ipsos concluded that 1/5th of the responders in their study did not like vaccination at all and that it remained the same up until October 2021 [14], [25]. Another study by Kaiser group, which is one of the largest medical insurance foundations in USA, showed that people who strongly resisted the vaccine with 'Definitely not' to getting vaccinated, remained unchanged over time [15] clearly pointing to that there will be people who will not get vaccinated and that is a problem as the virus can remain dormant in these people. The study can further investigate various changes to DNA using algorithms such as mentioned in [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27].

In this study, we see that a vast majority of people showed resistance and were on the side lines mainly because of concern of side effects, wait and see, and to see the efficacy of the vaccine. This is mainly triggered by the unexpected pause in Johnson and Johnson vaccine in the middle of the year [16], [26]. Other study also pointed to this pause from Johnson and Johnson as the reason people were still sitting on the side lines for other vaccines [17], [28]. We think from this study, that majority of the people over time realized that vaccine was better off than not as the number of deaths decreased considerably all over the globe and in USA. There were still a small percentage of people who did not take the vaccine at all. Today AI is influencing pretty much every industry, perhaps could lead to faster vaccine study and faster lead time to market [28].

6 CONCLUSION

In this paper, we presented the efficacy of vaccine which drove the resistance to vaccine down over time. There is a need to overcome vaccine resistance and this was very much needed to slow the spread of SARS-CoV-2. In this paper, our analysis showed different resistance to COVID-19 vaccines and the challenges FDA faced in getting the public accept the vaccine. The challenges were complex and multi-faceted, and it involved, race, gender, income, education, region, and zip codes. There is a need for sustained monitoring of vaccine efficacy over time and this is critical for policy decision makers to adjust the communication strategies, including the methods, language, and messengers, to improve efficacy and reach to all population in USA.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank my family members and friends for supporting me.

REFERENCES

- [1] Salmon, A., Dudley, M.Z., Glanz, J.M., Omer, S.B. (2015). Vaccine hesitancy: Causes, consequences, and a call to action, *Vaccine*, 33 (Suppl. 4): D66-D71, <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2015.09.035>.
- [2] Leask, J., Kinnersley, P., Jackson, C., Cheater, F., et al. (2012). Communicating with parents about vaccination: A framework for health professionals. *BMC Pediatrics*, 12: 154, <https://doi.org/10.1186/1471-2431-12-154>.
- [3] McClure, C.C., Cataldi, J.R., O'Leary, S.T. (2018). Vaccine hesitancy: Where We are and where we are going. *Clinical Therapeutics*, 39 (8): 1550-1562. <https://doi.org/10.1016/j.clinthera.2017.07.003>. Epub 2017 Jul 31. PMID: 28774498.
- [4] Dubé, E., Laberge, C., Guay, M., Bramadat, P., Roy, R., Bettinger, J.A. (2013). Vaccine hesitancy: An overview. *Human Vaccines & Immunotherapeutics*, 9: 8, 1763-1773, <https://doi.org/10.4161/hv.24657>.
- [5] Hamel, L., Kirzinger, A., Muñana, C., and Brodie M. KFF COVID-19 Vaccine Monitor: December 2020. The Kaiser Family Foundation, December 15, 2020. Available at <https://www.kff.org/coronavirus-covid-19/report/kff-covid19-vaccine-monitor-december-2020/>; last accessed April 22, 2021.
- [6] U.S. Census Bureau, Source and Accuracy Statements. Household Pulse Survey: March 17, 2021 – March 29, 2021. Available at https://www2.census.gov/programs-surveys/demo/technicaldocumentation/hhp/Phase3_Source_and_Accuracy_Week_27.pdf, last accessed May 25, 2021.
- [7] U.S. Census Bureau, American Community Survey Response Rates, <https://www.census.gov/acs/www/methodology/sample-size-and-data-quality/response-rates/>, last accessed May 25, 2021.
- [8] de Beaumont Foundation. Poll: The language of vaccine acceptance, available at <https://debeaumont.org/changing-the-covid-conversation/vaccineacceptance/>; last accessed April 22, 2021.
- [9] Daly M, Jones A, Robinson E. Public Trust and Willingness to Vaccinate Against COVID-19 in the US From October 14, 2020, to March 29, 2021. *JAMA*. Published online May 24, 2021. doi: 10.1001/jama.2021.8246.
- [10] Hamel, L., Lopes, L., Sparks, G., Stokes, M., Brodie, M. KFF COVID-19 Vaccine Monitor: April 2021. The Kaiser Family Foundation, March 30, 2021. Available at <https://www.kff.org/coronavirus-covid-19/poll-finding/kff-covid19-vaccine-monitor-april-2021/>; last accessed May 19, 2021.
- [11] Hamel, L., Lopes, L., Kearney, A., Brodie, M. KFF COVID-19 Vaccine Monitor: March 2021. The Kaiser Family Foundation, March 30, 2021. Available at <https://www.kff.org/coronavirus-covid-19/poll-finding/kff-covid-19-vaccine-monitor-march-2021/>; last accessed April 22, 2021.
- [12] Funk, C., and Tyson A. Growing share of Americans say they plan to get a COVID-19 vaccine or already have. The Pew Research Center Science & Society, March 5, 2021. Available at <https://www.pewresearch.org/science/2021/03/05/growing-share-of-americans-say-they-plan-to-get-a-covid-19-vaccine-or-already-have/>; last accessed April 22, 2021.
- [13] Hamel, L., Lopes, L., Sparks, G., Stokes, M., Brodie, M. KFF COVID-19 Vaccine Monitor: April 2021. The Kaiser Family Foundation, March 30, 2021. Available at <https://www.kff.org/coronavirus-covid-19/poll-finding/kff-covid19-vaccine-monitor-april-2021/>; last accessed May 19, 2021.
- [14] AXIOS. Axios-Ipsos poll: Americans say J&J pause was the right call. Available at <https://www.axios.com/axiosipsos-poll-johnson-and-johnson-vaccine-pause-a4eefe38-6aca-4a7e-b1d1-02e1b01a3480.html>; last accessed April 22, 2021.
- [15] Hamel, L., Lopes, L., Sparks, G., Stokes, M., Brodie, M. KFF COVID-19 Vaccine Monitor: April 2021. The Kaiser Family Foundation, March 30, 2021. Available at <https://www.kff.org/coronavirus-covid-19/poll-finding/kff-covid19-vaccine-monitor-april-2021/>; last accessed May 19, 2021.
- [16] AXIOS. Axios-Ipsos poll: Americans say J&J pause was the right call. Available at <https://www.axios.com/axiosipsos-poll-johnson-and-johnson-vaccine-pause-a4eefe38-6aca-4a7e-b1d1-02e1b01a3480.html>; last accessed April 22, 2021.
- [17] Hamel, L., Lopes, L., Sparks, G., Stokes, M., Brodie, M. KFF COVID-19 Vaccine Monitor: April 2021. The Kaiser Family Foundation, March 30, 2021. Available at <https://www.kff.org/coronavirus-covid-19/poll-finding/kff-covid19-vaccine-monitor-april-2021/>; last accessed May 19, 2021.

- [18] Haque, Waqar, Alex Aravind, and Bharath Reddy. «Pairwise sequence alignment algorithms: a survey.» *Proceedings of the 2009 conference on Information Science, Technology and Applications*. 2009.
- [19] Reddy, Bharath, and Richard Fields. «From past to present: a comprehensive technical review of rule-based expert systems from 1980–2021.» *Proceedings of the 2022 ACM Southeast Conference*. 2022.
- [20] Haque, W., Aravind, A., & Reddy, B. (2008, August). An efficient algorithm for local sequence alignment. In *2008 30th annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society* (pp. 1367-1372). IEEE.
- [21] Reddy, B., & Fields, R. (2022). Multiple sequence alignment algorithms in bioinformatics. In *Smart Trends in Computing and Communications: Proceedings of SmartCom 2021* (pp. 89-98). Springer Singapore.
- [22] Reddy, B., & Fields, R. (2020, March). Multiple Anchor Staged Alignment Algorithm–Sensitive (MASAA–S). In *2020 3rd International Conference on Information and Computer Technologies (ICICT)* (pp. 361-365). IEEE.
- [23] Reddy, B. G. (2009). *Multiple Anchor Staged Local Sequence Alignment Algorithm-MASAA*. University of Northern British Columbia.
- [24] Reddy, B., & Fields, R. (2020). Techniques for Reader-Writer Lock Synchronization. *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, 8 (4), 63-73.
- [25] Reddy, B., & Fields, R. (2024, April). Performance Analysis of Multiple Sequence Alignment Tools. In *Proceedings of the 2024 ACM Southeast Conference* (pp. 167-174).
- [26] Reddy, B., & Fields, R. (2023). Maximum Match Subsequence Alignment Algorithm Finely Grained (MMSAA FG). *arXiv preprint arXiv: 2305.00329*.
- [27] Bharath Reddy and Reginald Decastro, «Benefits of Machine Learning and Artificial Intelligence,» *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 43, no. 2, pp. 222–228, August 2024.
- [28] Reddy, M. (2020). *BIOINFORMATICS & PAIRWISE SEQUENCE ALIGNMENT: Local and Global Sequence Alignment Algorithms*. Independently published.

Shoulder Pain Intensity in Wheelchair Basketball Players in Benin: A Prospective Observational Study

Oscar Dagbémabou Oladouni Azé^{1,2}, Florentine Kouglo¹, Delphine Ouédraogo¹, Marc Charbel Gnonhossou¹, and Barnabé Akplogan¹

¹Unité de Recherche: Déficiences, Activités Physiques Adaptées et Réhabilitation (DAPAR) du Laboratoire de Motricité, Performance et Santé du Sportif (LaMoP2S), Institut National de la Jeunesse, de l'Éducation Physique et du Sport, Université d'Abomey-Calavi (INEPS-UAC), 01 BP 169, PORTO-NOVO, Benin

²Université de Lyon, UJM-Saint-Etienne, LIBM, EA 7424, F-42023, Saint-Etienne, France

Copyright © 2026 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Physical activity is crucial for the quality of life of individuals with disabilities. In many parasports, such as wheelchair basketball, the wheelchair is an essential component. However, the repetitive nature of wheelchair propulsion frequently leads to overuse injuries, with the shoulder being the most commonly affected joint. The aim of this study was to assess the intensity of shoulder pain in wheelchair basketball players in Benin at three time points: before a championship, immediately after the championship, and following a subsequent 3-month rest period, using the Wheelchair User's Shoulder Pain Index (WUSPI). This prospective observational study included 10 elite male wheelchair basketball players (mean age: 32 ± 5 years; mean experience: 13 ± 8 years). The WUSPI was administered at pre-championship (T0), post-championship (T1), and after a 3-month rest period (T2) to assess shoulder pain intensity during activities of daily living (ADLs). The Friedman test and post-hoc Wilcoxon signed-rank tests were used to compare scores between time points. The mean performance-corrected WUSPI (PC-WUSPI) score increased significantly from baseline at T0 (13.45 ± 5.77) to T1 (69.88 ± 21.91) ($p < 0.001$). Following the rest period, the score at T2 (43.92 ± 20.0) was significantly lower than at T1 ($p < 0.001$). However, the T2 score remained significantly higher than the initial baseline score at T0 ($p < 0.001$). Intensive competition induces a substantial increase in shoulder pain and functional limitation in elite wheelchair basketball players. While a 3-month rest period allows for significant pain reduction, recovery is incomplete, with pain levels remaining elevated above pre-competition baseline. These findings highlight the high physical demands of the sport and underscore the need for targeted pain management and recovery strategies.

KEYWORDS: WUSPI, Overuse Injury, Shoulder, Wheelchair Basketball, Pain Assessment, Benin, Shoulder Pain, Manual Wheelchair.

1 INTRODUCTION

Physical activity and sport play a crucial role in the quality of life for all individuals, and this is particularly true for those with disabilities [1]. Disability is understood as the complex interaction between an individual with a health condition (e.g., cerebral palsy, spinal cord injury) and the personal and environmental factors that may hinder their full participation in society [2]. The World Health Organization (WHO) defines disability as a generic term encompassing impairments, activity limitations, and participation restrictions [2].

Among parasports, wheelchair basketball has one of the most developed functional classification systems, enabling fair competition [3], [4]. Participation in wheelchair basketball offers numerous benefits, including improved self-esteem, enhanced physical conditioning, and greater self-awareness, making it an essential tool for social integration and rehabilitation [5]. However, the reliance on a manual wheelchair for both activities of daily living (ADLs) and athletic competition is a significant risk factor for the development of musculoskeletal disorders [6].

The human shoulder, with its high degree of mobility and limited intrinsic stability, is not biomechanically optimized for the repetitive, high-load propulsion tasks required of manual wheelchair users [7]. Consequently, the glenohumeral joint is subjected to considerable strain, which is often exacerbated in athletes [8], [9]. This chronic overuse frequently leads to degenerative soft-tissue pathologies, such as subacromial impingement syndrome, rotator cuff tears, and sprains, as well as radiologically-evident degenerative changes [10], [11]. For wheelchair users, the functional integrity of the upper limbs is paramount to maintaining independence [12].

Shoulder injury is a well-documented problem in wheelchair basketball [13], [14], [15], and numerous studies have identified shoulder pain as a primary factor limiting ADLs in individuals with paraplegia [16], [17]. In a study conducted in Burkina Faso, Ouédraogo et al. [17] demonstrated that wheelchair basketball induced joint pain, with pain intensity peaking 24 hours post-training. Similarly, Curtis et al. [13] reported a 72% prevalence of shoulder pain among wheelchair basketball players.

It is important to highlight the specific context of wheelchair basketball in West Africa, particularly in Benin, where the sport is often practiced using non-specialized wheelchairs, many of which are obtained through community donations. To date, research on wheelchair sports and the etiology of pain during practice in Benin remains scarce. The few existing studies have focused on pain management or on determining pain prevalence among players solely in Cotonou. This leaves a significant knowledge gap, as handisport associations are also active in northern Benin.

While several instruments exist to measure pain or functional impairment, such as the Brief Pain Inventory (BPI) and the Visual Analogue Scale (VAS), the Wheelchair User's Shoulder Pain Index (WUSPI) is the most specific and validated tool for this population. The WUSPI was developed to measure the intensity of shoulder pain and its impact on the performance of ADLs specifically in manual wheelchair users [18], [19].

Therefore, the aim of this study was to use the WUSPI to assess the intensity of shoulder pain in Beninese wheelchair basketball players before and after a national championship, and following a subsequent 3-month rest period.

2 METHODS

2.1 STUDY DESIGN

This study employed a prospective, longitudinal observational design to assess shoulder pain in elite male wheelchair basketball players at three distinct time points: baseline (T0), taken two days before a national championship; post-competition (T1), taken 72 hours after the final match; and a 3-month follow-up (T2), after a prescribed period of rest from the sport. The protocol was conducted in accordance with the principles of the Declaration of Helsinki, and all participants provided written informed consent prior to inclusion. A convenience sample of 14 players from two clubs competing under the Benin Handisport Federation was initially recruited. Inclusion criteria required participants to be registered players in Benin, attend training regularly, and possess a functional wheelchair. Exclusion criteria included the use of a damaged wheelchair, inability to follow the protocol, or participation in other sports during the rest period. Of the 12 players who consented, two were later excluded for violating the rest protocol, resulting in a final cohort of 10 participants for analysis. Data were collected at each time point using the Wheelchair User's Shoulder Pain Index (WUSPI), a validated 15-item questionnaire assessing pain during activities of daily living on a 10-cm Visual Analogue Scale (VAS) [18]. To account for unperformed tasks, a performance-corrected score (PC-WUSPI) was calculated by summing the VAS scores for performed items, dividing by the number of activities performed, and multiplying by 15 [13].

2.2 STATISTICAL ANALYSIS

All statistical analyses were performed using IBM SPSS Statistics (Version 27). The distribution of quantitative data was assessed for normality using the Shapiro-Wilk test. Descriptive statistics were used to summarize participant and wheelchair characteristics. Quantitative variables were expressed as mean $\pm$ standard deviation (SD), while qualitative variables were presented as frequencies and percentages. As the WUSPI score data were not normally distributed, non-parametric tests were employed for inferential analysis. The Friedman test was used to compare the PC-WUSPI scores across the three time points (T0, T1, and T2). When the Friedman test indicated a significant overall difference, post-hoc analysis was conducted using the Wilcoxon signed-rank test with a Bonferroni correction to identify which specific pairs of time points differed significantly. The alpha level for statistical significance was set at $p < 0.05$ for all tests.

2.3 ETHICAL CONSIDERATIONS

This research was conducted in accordance with the ethical principles of the Declaration of Helsinki. It respected the rights, dignity, and well-being of participants, without compromising their physical or moral integrity. All study participants were informed about the research protocol, its objectives, and potential benefits. They were assured that, upon completion of the study, the results would be communicated to them confidentially and as soon as possible. Participants were also guaranteed that the collected data would be anonymised and used solely for the purposes of this research.

3 RESULTS

3.1 PARTICIPANT CHARACTERISTICS

The 10 male wheelchair basketball players included in the final analysis had a mean age of 32 ± 5 years (range: 24-41) and a mean Body Mass Index (BMI) of 23 ± 4 kg/m². The mean duration of disability was 29 ± 8 years, and the participants had a mean of 13 ± 8 years of experience in wheelchair basketball. The etiologies of disability were poliomyelitis (60%), amputation (30%), and paraplegia (10%). Regarding playing chair comfort, 60% of players reported experiencing "no comfort," 20% reported being "comfortable," and 20% reported being "very comfortable" (Table 1).

Table 1. Player characteristics, type of disability and feeling in the wheelchair: N = 10

	m ± s	Min - Max	N (%)
Anthropological characteristics			
Age (years)	32.0 ± 5.0	24 – 41	NA
Body mass (kg)	60.0 ± 9.0	45 – 80	NA
Body mass index (kg.m ⁻²)	23.0 ± 4.0	16 – 29	NA
Game features			
Anteriority of disability (years)	29.0 ± 8.0	19 - 46	NA
Length of practice (years)	13.0 ± 8.0	2 - 27	NA
Type of disability			
Poliomyelitis	NA	NA	6 (60).
Amputee	NA	NA	3 (30).
Paralyzed	NA	NA	1 (10)
Feeling in the chair			
Not comfortable	NA	NA	6 (60).
At ease	NA	NA	2 (20).
Very comfortable	NA	NA	2 (20).

BM: Body weight **BMI:** Body mass index **m:** average **s:** standard variation **Min:** Minimum **Max:** Maximum

3.2 WHEELCHAIR CHARACTERISTICS

The wheelchairs used by the players had a mean weight of 13 ± 2 kg (range: 10-17 kg). All chairs had four wheels (two large, two small). The mean large wheel diameter was 55 ± 10 cm, and the mean small wheel diameter was 7 ± 2.05 cm. The mean seat height from the ground was 52 ± 13 cm, and the mean backrest height was 28 ± 5 cm (Table 2).

Table 2. Characteristics of the play wheelchairs in the study

	m ± s	Min - Max
Number of wheels	4,0 ± 0,0	4 – 4
Large wheel diameter (cm)	55,0 ± 10	44 – 67
Small wheel height (cm)	7,0 ± 2,05	5 – 10
Footrests (cm)	15,0 ± 4,0	6– 21
Seat height (cm)	52,0 ± 13,0	36 – 67
Cushion thickness (cm)	5,0 ± 1,0	4 – 7
Backrest height (cm)	28,0 ± 5,0	21 – 33
Chair weight (kg)	13,0 ± 2,0	10 – 17

m: average *s*: Standard variation *Min*: Minimum *Max*: Maximum

3.3 CHANGES IN WUSPI SCORES OVER TIME

The primary analysis focused on the change in the performance-corrected Wheelchair User's Shoulder Pain Index (PC-WUSPI) score across the three time points. The Friedman test revealed a statistically significant difference in PC-WUSPI scores over time ($\chi^2(2) = 17.2$, $p < 0.001$). Post-hoc analysis using the Wilcoxon signed-rank test with a Bonferroni correction was performed to identify where these differences occurred: PC-WUSPI scores increased significantly from pre-championship (T0: 13.45 ± 5.77) to post-championship (T1: 69.88 ± 21.91) ($p = 0.005$). Scores decreased significantly from post-championship (T1) to the 3-month follow-up (T2: 43.92 ± 20.0) ($p = 0.005$). Despite this decrease, scores at the 3-month follow-up (T2) remained significantly higher than the pre-championship baseline at T0 ($p = 0.005$) (**Table 3**).

Table 3. Variation in WUSPI scores for each player (before, after and three months)

	Anteriority of disability (years)	Length of practice (years)	Body mass index (kg.m⁻²)	Items validated			Score PC-WUSPI		
				BF	AF	3 Months AF	BF	AF	3 Months AF
P1	20	15	16.52	14	13	13	13.05	50.4	16.05
P2	46	27	27.05	12	13	14	21.75	73.95	35,25
P3	30	25	24.44	14	14	14	19.05	44,55	15
P4	23	15	27.35	13	13	13	22.05	45.75	36.9
P5	30	19	24.46	12	12	12	14.25	56.12	75
P6	37	5	20.7	12	12	12	7.35	89.12	69
P7	34	2	29.33	13	13	13	10.2	94.84	60
P8	19	3	18.07	13	13	13	11.7	87.34	45
P9	28	15	25.39	12	12	12	9.23	101.5	43.33
P10	24	6	25.15	12	12	12	6	55.25	46.67

P: Players *BF*: Before *AF*: After

3.4 ANALYSIS OF INDIVIDUAL WUSPI ITEMS

A detailed analysis of the 15 individual WUSPI items was conducted to identify the most painful activities at each time point. A consistent pattern was observed across most activities of daily living (ADLs): Reported pain intensity for individual items peaked at the post-championship time point (T1). At the 3-month follow-up (T2), pain scores for these items decreased but did not return to the pre-championship baseline levels (T0). The statistical analysis confirmed that the changes in pain intensity over time were significant for the majority of the individual items ($p < 0.05$). It was also noted that several ADLs, particularly those related to vehicle transfers ("transferring from wheelchair to car," "placing wheelchair in car") and "driving," were not performed by all participants at each time point (**Table 4**).

Table 4. Comparison of mean shoulder pain intensities by item in handibasket players

	m ± s			p Value (Friedman)
	BEFORE	AFTER	3 MONTHS	
Transfers				
1 Armchair bed	1.1 ± 1.4	5.4 ± 2.8 *	3.1 ± 1.4 ‡ †	0.007
2 Armchair to the car	NOT REALISED			
3 Armchair to the shower	0.9 ± 1.0	4.5 ± 3.2 *	3.1 ± 1.4 ‡	0.004
4 Armchair in car	NOT REALISED			
Wheelchair mobility				
5 Push chair 10min	1.3 ± 1.8	5.8 ± 2.9 *	5.3 ± 2.5 ‡	0.002
6 Mounting ramps	1.0 ± 0.8	5.0 ± 2.5 *	3.9 ± 2.6 ‡	0.014
Personal care				
7 Shelf object	1.0 ± 0.6	4.7 ± 2.9 *	4.3 ± 2.3 ‡	0.008
8 Put on pants	0.6 ± 0.4	2.4 ± 1.7 *	0.6 ± 1.6 †	0.001
9 Put on a t-shirt	1.2 ± 1.9	5.4 ± 2.7 *	1.2 ± 2.1 †	0.000
10 Put on a shirt	0.7 ± 0.9	2.3 ± 1.9 *	0.2 ± 0.6 ‡ †	0.000
11 Washing your back	0.7 ± 0.4	6.3 ± 2.5 *	3.0 ± 1.7 ‡ †	0.000
General activities				
12 Daily activities	0.6 ± 0.3	4.0 ± 2.6 *	1.3 ± 1.6 †	0.002
13 Driving	NOT REALISED			
14 Cleaning	0.6 ± 0.3	4.2 ± 3.2 *	1.2 ± 1.4 †	0.002
15 Sleep	0.6 ± 0.2	5.2 ± 2.5 *	1.7 ± 1.9 †	0.001
PC Score -WUSPI	13.45 ± 5.77	69.88 ± 21.91 *	43.92 ± 20.0 ‡ †	0.000

*: Significant difference $p < 0.05$ between before and after †: Significant difference $p < 0.05$ between after and 3 months after ‡: Significant difference $p < 0.05$ between before and 3 months after

4 DISCUSSION

The primary aim of this study was to prospectively assess the intensity of shoulder pain in elite wheelchair basketball players in Benin at three key time points: before a championship, immediately after, and following a three-month rest period. The principal finding of our study is that an intensive competition period leads to a more than fivefold increase in shoulder pain and functional impairment, as measured by the PC-WUSPI. Furthermore, while a subsequent three-month rest period allowed for a significant reduction in pain, recovery was incomplete, as pain scores remained significantly elevated above the pre-competition baseline.

The substantial increase in pain observed immediately post-championship (T1) aligns with existing literature highlighting the high physical demands of elite wheelchair basketball [13], [14]. The sport requires repetitive, high-intensity, and often explosive upper-limb movements, including propulsion, shooting, and physical contact with other players. This places enormous stress on the shoulder joint, which is biomechanically ill-suited for chronic weight-bearing and high-load activities [7], [20]. The high repetition and joint compression forces are known to trigger or aggravate underlying degenerative processes such as tendinopathies and osteoarthritis [11], [21], which likely explains the dramatic surge in pain reported by the athletes in our cohort after the championship.

A critical finding of our study is the incomplete recovery observed at the three-month follow-up (T2). This suggests that the pain experienced by these athletes is not merely acute, transient muscle soreness but may reflect a more persistent, underlying inflammatory or sub-clinical degenerative condition. This condition appears to be exacerbated by intense competition and is not fully resolved by a prolonged period of rest alone. This observation is further supported by the analysis of individual WUSPI items, which showed that pain remained elevated at T2 for demanding activities like "pushing the wheelchair for 10 minutes or more" and "lifting objects overhead." These tasks directly stress the rotator cuff and subacromial structures, indicating a persistent pathological state. This underscores the potential for cumulative damage and the development of chronic, debilitating shoulder conditions over successive competitive seasons if not managed proactively.

When comparing our PC-WUSPI scores to those in the literature, our baseline scores at T0 (13.45 ± 5.77) are comparable to those reported by Curtis et al. (15.6 ± 20.5) in a similar population of wheelchair basketball players [18]. However, our post-

championship scores (69.88 ± 21.91) are considerably higher. This notable discrepancy may be attributed to several factors specific to the context of this study. A crucial factor is likely the equipment used. As noted in the introduction, athletes in Benin often rely on non-specialized wheelchairs obtained through donations. Ill-fitting chairs can force athletes into suboptimal biomechanical positions during propulsion, significantly increasing joint stress and leading to higher pain levels compared to athletes using custom-fitted, high-performance sports wheelchairs [17].

Furthermore, the potential lack of access to specialized strength and conditioning programs, advanced coaching techniques, and comprehensive medical support in this low-resource setting could also contribute to greater post-competition pain and poorer long-term recovery.

In our analysis of individual player characteristics, we did not find a clear pattern linking factors such as age, BMI, or duration of disability to the intensity of shoulder pain. This aligns with findings from Mercer et al. [22], who also argued that age is not a primary predictor of shoulder pain in this population. While some literature suggests that playing experience might be a factor [23], [24], [25], our small sample size prevented a robust statistical exploration of these correlations [25].

This study has several limitations that must be acknowledged. The primary limitation is the small sample size ($n=10$), which restricts the generalizability of our findings and the statistical power to conduct more complex correlational analyses. The use of a convenience sample may also have introduced selection bias. Additionally, the etiology of disability and other demographic data were self-reported and not clinically verified. Finally, while the WUSPI is a validated tool, it remains a subjective measure of pain. Future research would benefit from incorporating objective measures, such as dynamometry for strength testing or ultrasound imaging to assess soft-tissue pathology.

Despite these limitations, this study provides the first longitudinal data on the impact of competition and rest on shoulder pain in wheelchair basketball players in Benin. The findings clearly demonstrate that elite competition induces severe shoulder pain and that rest alone may be insufficient for complete recovery. This highlights an urgent need for targeted interventions to protect the shoulder health and prolong the careers of these athletes. Such interventions should include not only improved access to appropriate, well-fitted equipment but also the implementation of evidence-based injury prevention programs, structured conditioning, and effective recovery strategies.

5 CONCLUSION

This study demonstrates that elite wheelchair basketball players in Benin experience a severe increase in shoulder pain and functional impairment immediately following a competitive championship. While a subsequent three-month rest period leads to a significant reduction in pain, recovery is incomplete, with pain levels remaining elevated above pre-competition baseline. These findings highlight the substantial physical toll of the sport and underscore the urgent need for proactive strategies—including access to appropriate equipment, structured conditioning, and evidence-based pain management—to protect the long-term shoulder health of these athletes.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to express their sincere gratitude to the players and coaching staff of the Buffle Handibasket of Parakou and Lion Handibasket of Cotonou clubs for their enthusiastic participation and dedication throughout the study. We thank the Benin Handisport Federation for facilitating access to participants and providing logistical support.

REFERENCES

- [1] « Sport et activité physique adaptée (APA) », sportanddev. Consulté le: 15 juillet 2025.
[En ligne]. Disponible sur: <https://www.sportanddev.org/fr>.
- [2] World Health Organization, World report on health equity for persons with disabilities, Executive Summary, 1st ed. Geneva: World Health Organization, 2022.
- [3] IWBF, « Classification in Wheelchair Basketball ». Consulté le: 15 juillet 2025.
[En ligne]. Disponible sur: <https://www.iwbf.org/our-sport/classification>.
- [4] « International Wheelchair Basketball Federation Official Player Classification Manual. Canada, IWBF, 2014. p. 5-26 ». Consulté le: 15 juillet 2025.
[En ligne]. Disponible sur:
https://www.wheelchairbasketball.ca/uploadedFiles/Members/Classifiers/Policies_and_Procedures/CLASSIFICATION%20MANUAL%202014-2018%20ENGLISH%20FINAL.pdf
- [5] L. Alexander, A Sporting Chance: How Ludwig Guttman Created the Paralympic Games. HarperCollins, 2020.
- [6] S. García-Gómez et J. Pérez-Tejero, « Prevención del dolor de hombro en jugadoras de baloncesto en silla de ruedas », Fisioterapia, vol. 46, p. S35, juill. 2024, doi: 10.1016/S0211-5638 (24) 60075-1.
- [7] M. G. Van Straaten, B. A. Cloud, M. M. Morrow, P. M. Ludewig, et K. D. Zhao, « Effectiveness of home exercise on pain, function, and strength of manual wheelchair users with spinal cord injury: a high-dose shoulder program with telerehabilitation », Arch. Phys. Med. Rehabil., vol. 95, no 10, p. 1810-1817.e2, oct. 2014.
doi: 10.1016/j.apmr.2014.05.004.
- [8] N. Chenuz et J. Nzamba, « Paraplégiques en fauteuil roulant manuel: activités contraignantes dues aux douleurs d'épaule », Mémoires niveau bachelor, Haute Ecole de Santé, Vaud, 2014. doi: 10.22005/bcu.17786.
- [9] K. a. M. Samuelsson, H. Tropp, et B. Gerdle, « Shoulder pain and its consequences in paraplegic spinal cord-injured, wheelchair users », Spinal Cord, vol. 42, no 1, p. 41-46, janv. 2004, doi: 10.1038/sj.sc.3101490.
- [10] R. S. Burnham, L. May, E. Nelson, R. Steadward, et D. C. Reid, « Shoulder pain in wheelchair athletes. The role of muscle imbalance », Am. J. Sports Med., vol. 21, no 2, p. 238-242, 1993, doi: 10.1177/036354659302100213.
- [11] H. Gellman, I. Sie, et R. L. Waters, « Late complications of the weight-bearing upper extremity in the paraplegic patient », Clin. Orthop., no 233, p. 132-135, août 1988.
- [12] M. Chevnard, C. Taillefer, C. Picq, et P. Pradat-Diehl, « Ecological assessment of executive functions in a patient with acquired brain injury », Ann. Readaptation Med. Phys. Rev. Sci. Soc. Francaise Reeduction Fonct. Readaptation Med. Phys., vol. 51, no 2, p. 74-83, mars 2008, doi: 10.1016/j.annrmp.2007.10.008.
- [13] K. A. Curtis et K. Black, « Shoulder pain in female wheelchair basketball players », J. Orthop. Sports Phys. Ther., vol. 29, no 4, p. 225-231, avr. 1999, doi: 10.2519/jospt.1999.29.4.225.
- [14] J. Nyland, K. Robinson, D. Caborn, E. Knapp, et T. Brosky, « Shoulder rotator torque and wheelchair dependence differences of National Wheelchair Basketball Association players », Arch. Phys. Med. Rehabil., vol. 78, no 4, p. 358-363, avr. 1997, doi: 10.1016/s0003-9993 (97) 90226-4.
- [15] « Shoulder Pain in Spanish Wheelchair Basketball Players: a pilot study », in ResearchGate, Consulté le: 15 juillet 2025.
[En ligne]. Disponible sur:
https://www.researchgate.net/publication/277716762_Shoulder_Pain_in_Spanish_Wheelchair_Basketball_Players_a_pilot_study.
- [16] J. C. Bayley, T. P. Cochran, et C. B. Sledge, « The weight-bearing shoulder. The impingement syndrome in paraplegics », J. Bone Joint Surg. Am., vol. 69, no 5, p. 676-678, juin 1987.
- [17] Ouedraogo D, Aze O, Akplogan B, Sitou R, Ahounou J. « Nécessité d'une meilleure adaptation des fauteuils de jeu pour une pratique saine du basketball en fauteuil roulant au Burkina-Faso. Réflex Sport. 29 déc 2022; (2): 1-13. » Consulté le: 15 juillet 2025.
[En ligne]. Disponible sur: <https://www.bec.uac.bj/uploads/publication/e48faa4344ce4b1541ea69655c9955dd.pdf>
- [18] K. A. Curtis, G. A. Drysdale, R. D. Lanza, M. Kolber, R. S. Vitolo, et R. West, « Shoulder pain in wheelchair users with tetraplegia and paraplegia », Arch. Phys. Med. Rehabil., vol. 80, no 4, p. 453-457, avr. 1999, doi: 10.1016/s0003-9993 (99) 90285-x.
- [19] K. A. Curtis et al., « Development of the Wheelchair User's Shoulder Pain Index (WUSPI) », Paraplegia, vol. 33, no 5, p. 290-293, mai 1995, doi: 10.1038/sc.1995.65.
- [20] M. Alm, H. Saraste, et C. Norrbrink, « Shoulder pain in persons with thoracic spinal cord injury: prevalence and characteristics », J. Rehabil. Med., vol. 40, no 4, p. 277-283, avr. 2008, doi: 10.2340/16501977-0173.
- [21] M. L. Boninger, R. A. Cooper, M. A. Baldwin, S. D. Shimada, et A. Koontz, « Wheelchair pushrim kinetics: body weight and median nerve function », Arch. Phys. Med. Rehabil., vol. 80, no 8, p. 910-915, août 1999, doi: 10.1016/s0003-9993 (99) 90082-5.

- [22] J. L. Mercer, M. Boninger, A. Koontz, D. Ren, T. Dyson-Hudson, et R. Cooper, « Shoulder joint kinetics and pathology in manual wheelchair users », *Clin. Biomech. Bristol Avon*, vol. 21, no 8, p. 781-789, oct. 2006, doi: 10.1016/j.clinbiomech.2006.04.010.
- [23] R. J. Meislin, J. W. Sperling, et T. P. Stitik, « Persistent shoulder pain: epidemiology, pathophysiology, and diagnosis », *Am. J. Orthop. Belle Mead NJ*, vol. 34, no 12 Suppl, p. 5-9, déc. 2005.
- [24] K. E. Essi, J. M. El-Shafie, Z. A. Hawamdah, et S. I. Zaqout, « Shoulder Pain among Rehabilitated Spinal Cord Injured Persons Using Manually Propelled Wheelchairs in the Gaza Strip: A Survey », *Disabil. CBR Incl. Dev.*, vol. 23, no 2, Art. no 2, août 2012, doi: 10.5463/dcid.v23i2.105.
- [25] K. Tsunoda et al., « Correlates of shoulder pain in wheelchair basketball players from the Japanese national team: A cross-sectional study », *J. Back Musculoskelet. Rehabil.*, vol. 29, no 4, p. 795-800, nov. 2016, doi: 10.3233/BMR-160691.

Valorisation de la tige de sissongo (*Pennissetum purpureum*) pour la production des briques de terre compressées (BTC) dans l'arrondissement de Yabassi, Département du Nkam, Région du Littoral au Cameroun

[Valorisation of the Sissongo straws (*Pennissetum purpureum*) for the production of Compressed earth mud bricks 'BTC' in the locality of Yabassi, Nkam Division, Littoral Region of Cameroon]

MOUNDOM Amadou¹, EFON Boniface², NDJEUKOUA TCHEBDA Léolain Rostand³, BAANA Abouar⁴, MELENDE ABATE David Aymar⁵, MANJIA Marcelline Blanche⁶, NGAPGUE François⁷, TAMO TATIETSE Thomas⁸, and PETTANG Chrispin⁸

¹Maître de conférences en Génie Civil, FASA, Université de Dschang, Cameroon

²Maître de conférences en Génie Civil, Université d'Ebolowa, Cameroon

³Ingenieur du Génie Rural, FASA, Université de Dschang, Cameroon

⁴Chargé de Cours en Génie Civil, ENSPM, Université de Maroua, Cameroon

⁵Etudiant de troisième cycle au Génie Rural, FASA, Université de Dschang, Cameroon

⁶Professeur Titulaire en Génie Civil, ENSPY, Université de Yaoundé 1, Cameroon

⁷Professeur Titulaire en Génie Civil, IUT-FV de Bandjoun, Université de Dschang, Cameroon

⁸Professeur Titulaire (HDR en Génie Civil, ENSPY, Université de Yaoundé 1, Cameroon

Copyright © 2026 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: In order to meet the sustainable development goals, global policies are strongly oriented towards the valorization of local materials such as agricultural by-products. Cameroon integrates this important concern into its development strategies, taking into account the environmental protection aspect. It is in this context that our study proposes the development of compressed earth bricks 'BTC' stabilized with sissongo straws (*Pennissetum purpureum*). The main objective of this work is to study the effect of using vegetable straws, in particular the sissongo straws on the mechanical properties of compressed earth blocks and its sensitivity to water, through its total absorption. Tests (particle size analysis, water content, Atterberg limits, specific gravity, modified Proctor) were conducted on Yabassi soils; water content test was conducted on sissongo straws; compression, bending and absorption tests were conducted on compressed earth blocks. For the preparation of the mixtures, 0%, 0.05 %, 0.1 %, 0.2 %, 0.3 %, 0.4% and 0.5% by dry weight of substitution of soil by sissongo straws were used based on previous studies that used the same percentages for rice straws in the manufacture of earth bricks and a compaction pressure of 3.43 MPa (maximum pressure of the hydraulic press). The results showed that the addition of these materials to 0.3 % straws gave a maximum compressive strength of 3.058 MPa and contributed to the improvement in compressive strength of bricks of 1.1 MPa, compared to that of controlled specimen 0% straws (1.95 MPa). Although our 'BTCs' in the building are not really experimenting bending, we have subjected the specimens of each formulation to tensile test, the maximum bending stress recorded was that of the specimen containing 0.4 % straws with a stress of 0.367 MPa. The test pieces containing 0 % to 4 % have respective absorption coefficients of 4.5 and 2.06 which are within the recommended range of (2 to 15). Absorption time by capillary action is greater for 0 % straws incorporation (30s) than that containing 0.3 % straws incorporation (14s). Finally, recommendations were

made to take full advantage of stabilized compressed earth bricks with Sissongo straw (*Pennissetum purpureum*) in construction. Emphasis was placed on environmental, economic and social benefits.

KEYWORDS: compressed earth blocks, Sissongo straws, compressive strength, bending strength, total water absorption, swelling.

RESUME: Afin de répondre aux objectifs de développement de la localité de Yabassi, les politiques sont fortement orientées vers la valorisation des matériaux locaux tels que les sous-produits agricoles. Le Cameroun intègre cette importante préoccupation dans ses stratégies de développement, avec à la clé la prise en compte du volet protection de l'environnement. C'est dans ce contexte que notre étude propose la mise au point des briques de terre comprimées (BTC) stabilisées à la paille de sissongo (*Pennissetum purpureum*). L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'effet de l'utilisation des pailles végétales, notamment les pailles de sissongo sur les propriétés mécaniques (BTC) stabilisées à la paille de sissongo (*Pennissetum purpureum*) et aussi la sensibilité à l'eau de ces BTC. Les essais (d'analyse granulométrique, de teneur en eau, de Limites d'Atterberg, de Proctor Modifié, de poids spécifique) ont été réalisés sur les sols utilisés à Yabassi; L'essai de teneur en eau réalisé sur le sissongo; Les essais (de résistance à la compression, à la flexion, d'absorption d'eau) ont été réalisés sur les BTC; Pour les formulations, les taux d'incorporation du sissongo dans le sol de 0%, 0,05 %, 0,1 %, 0,2 %, 0,3 %, 0,4 % et 0,5 % du poids du mélange sec ont été testés en se basant sur des études antérieures ayant utilisé les mêmes taux pour l'incorporation de la paille de riz dans la fabrication des briques de terre et une contrainte de compactage 3,43 MPa (contrainte maximale de la presse hydraulique). Les résultats ont montré que l'ajout de ces matériaux à 0,3 % de paille a donné une résistance maximale en compression de 3,058 MPa et a contribué à l'amélioration de la résistance mécanique des briques de 1,1 MPa par rapport à l'éprouvette témoin 0% de paille (1,95MPa). Malgré que nos BTC dans le bâtiment ne soient pas vraiment sollicitées en flexion, nous avons soumis 1es éprouvettes de chaque formulation à l'essai de traction, la contrainte maximale en flexion enregistrée est celle l'éprouvette contenant 0,4% de paille avec une contrainte de 0,367 MPa. Concernant la sensibilité à l'eau, les éprouvettes contenant 0 % à 4% de sissongo ont des coefficients d'absorption respectifs 4,5 et 2,06 qui se situent dans la plage recommandée (2 à 15). Le temps d'absorption par capillarité est plus important à 0 % de pailles (30s) que celle contenant 0,3 % de pailles avec une durée maximale de 14s. Les recommandations ont été faites pour l'utilisation de ces BTC stabilisées avec les pailles de sissongo dans la construction compte tenu des avantages environnemental, économique et social.

MOTS-CLEFS: briques de terre compressées, pailles de Sissongo, résistance en compression, résistance en flexion, absorption totale d'eau, gonflement.

1 INTRODUCTION

La préservation de notre planète contre la pollution constitue actuellement un intérêt primordial et une responsabilité commune (Taallah, 2014). Face à ce défi, et en vue de répondre aux enjeux de développement durable, le secteur du bâtiment est dans l'obligation de mettre en place de nouvelles pratiques et méthodes de construction tout en tenant en compte des critères économiques et sociaux (Jehanne, 2015). À cet effet, des projets ambitieux sont établis afin de bien gérer les ressources naturelles et de contribuer ainsi à la diminution du phénomène de réchauffement climatique. Aujourd'hui, nos villes sont confrontées à des défis démographiques, environnementaux, économiques, sociaux et spatiaux sans précédents. Suite au phénomène majeur d'urbanisation, six personnes sur dix dans le monde résideront dans les zones urbaines d'ici 2030. Plus de 90 % de cette croissance aura lieu en Afrique, Asie, Amérique latine et dans les caraïbes (ONU-Habitat). En 2012 le programme communal de développement de Yabassi (PCD) à moyen et long terme de Yabassi, prévoit que plus d'un habitant sur deux vivra en ville à l'horizon 2030 si rien n'est fait. Actuellement la ville, du point de vue du cadre de vie de la majeure partie de la population se caractérise par la précarité et l'insalubrité de l'habitat assimilable même à une bidonvilisation de ces dernières (PNDP, 2012). Selon Meukam (2004), le coût de construction des bâtiments en matériaux conventionnels reste toujours élevé par rapport aux revenus de la plus grande partie de la population Camerounaise. Par ailleurs selon le Rapport national de la contribution du Cameroun sur le logement et développement durable en milieu urbain en 2015, 56,5 % de la population de plus (15 à 59 ans) se retrouvent également en milieu urbain; il est de même de la population de plus 15 ans, dont 54,4 % vivent en milieu urbain et donc à peu près 45 % de la population vivent en milieu rural et dans des habitats précaires. Les régions littorales qui sont caractérisées par un climat chaud et sec souffrent depuis longtemps de plusieurs problèmes en termes d'habitats et de constructions. Les constructions réalisées ne répondent en aucun cas aux exigences climatiques de ces régions. Les matériaux de construction utilisés sont souvent le béton ou des produits cimentaires tels que les parpaings ou les mortiers qui présentent des propriétés thermiques assez mauvaises (Chaib, 2017). Pourtant ces régions possèdent plusieurs matériaux locaux (l'argile, le gypse...) qui ont anciennement prouvé leurs efficacités thermiques et mécaniques. Cet habitat n'offre aucun confort au regard du développement actuel de la société et des changements climatiques. Voilà ce qui explique l'enjeu de l'habitat pour les gouvernants, tant en zone péri urbaine que rurale du Cameroun mais également de tous les autres pays en voie de développement, caractérisés par leur forte croissance de la population et l'urbanisation rapide des villes (Meukam, 2004).

Face à l'urbanisation croissante des villes, la précarité, l'insalubrité de l'habitat assimilable même à une bidonvilisation le réchauffement climatique et l'insalubrité, deux fronts de lutte s'imposent: la modernisation de l'habitat rural afin de contrer l'exode rural et la mise en œuvre d'une politique d'aménagement de l'habitat rural qui doit prévenir la tendance à la bidonvilisation si caractéristique des villes africaines. Pour cela, la terre a démontré largement son apport bénéfique au sein d'une habitation tant ses vertus sont nombreuses (Bruno et *al.*, 2015). Pourtant, un certain nombre de difficultés liées à l'emploi de l'argile dans la construction se posent. Il s'agit entre autres de la variation de volume (retrait et gonflement) au cours du séchage du matériau provoquant de nombreuses fissurations et atténuant donc les performances mécaniques de ce dernier (Gc, Sebaa, 2021). L'incorporation de paille de Sissongo végétales, matières premières abondantes et bon marché, dans une matrice à base de terre peut être une voie intéressante pour améliorer les propriétés des mortiers de terre.

Cette idée est inspirée du matériau utilisé pour la construction des greniers en terre pour le stockage des vivres en milieu rural au Nord-Ouest du Bénin, ouvrages ayant une durée de vie allant jusqu'à 50 ans (Ambarka, 2002). Des analyses d'identification faites sur le banco de grenier ont donné l'idée que le mélange utilisé pourrait servir à la fabrication de blocs de maçonnerie pour les parois en élévation ou pour la réalisation de planchers à corps creux et à poutrelles de bâtiments. Swamy et *al.* (1984) se sont intéressés à l'étude de l'incorporation de fibres de sisal et de noix de coco dans un sol fin. Ils ont constaté que les performances mécaniques sont modérées avec une amélioration de la ductilité du sol fibré par rapport au sol non fibré.

L'objectif général de ce travail est: l'étude des propriétés physiques de la terre et du sissongo du présent travail, étude des propriétés mécaniques et la sensibilité à l'eau des briques de terre comprimées stabilisées à la paille de sissongo (*Pennisetum purpureum*) produites dans l'arrondissement de Yabassi.

La réalisation de l'objectif principal passe par les objectifs spécifiques ci-dessous:

- D'étudier certaines propriétés géotechniques du sol et de sissongo de Yabassi;
- De déterminer la résistance mécanique des BTC stabilisées à la paille de sissongo;
- D'étudier l'absorption en eau par capillarité des BTC stabilisées à la paille de sissongo;
- De faire une proposition en vue de l'utilisation des briques fabriquées.

2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 LA TERRE

2.1.1 DÉFINITION

Le sol est la fraction solide de la sphère terrestre. À la surface du sol, la terre est un matériau meuble, d'épaisseur variable, qui supporte les êtres vivants et leurs ouvrages et où poussent les végétaux (Mariette, 2021). La terre est formée à partir d'une roche mère par des processus très lents de dégradation et par des mécanismes très complexes de migration de particules (Kazitani, 2016). Il en résulte une infinité de sortes de terres ayant des caractéristiques variées. La terre végétale ou sol des agronomes, riche en matière organique, surmonte la roche mère, plus ou moins altérée. Lorsqu'ils sont meubles et contiennent peu de matière organique, les niveaux superficiels des sols sont utilisables pour la construction en terre crue (Houben, Guillaud, 2006).

2.1.2 NIVEAU GÉOLOGIQUE

La terre est définie comme la couche d'épaisseur variable de matière meuble disponible sur la surface terrestre. Cette fine couche est issue de la dégradation des roches mères par des procédés d'altération sur des périodes géologiques. À l'épreuve des années d'érosion causée par le vent, la pluie, le soleil ou encore le gel, les particules de roches solides se fragmentent progressivement pour former des grains de plus en plus petits, les sédiments (Benhaoua, 2021).

Ainsi, la terre présente à la surface de notre planète peut être transformée facilement pour constituer un matériau de construction idéal. Les grains très fins la constituant peuvent être agglomérés entre eux lorsqu'on les mélange avec de l'eau et les met en forme. L'excès d'eau va progressivement s'échapper pour être remplacé par l'air. Le mélange grain, air et eau forme un complexe relativement solide, permettant de construire. C'est le passage « du grain à l'architecture » (DOAT et *al.*, 1979). Comme le béton, ou la pierre, le matériau ainsi formé est amené à se dégrader au fil du temps pour être naturellement retransformé en sédiments. Une fois redevenue poussière, la terre peut être réutilisée pour confectionner des matériaux et bâtir un nouvel édifice (Houben, 2006). La Terre crue est donc un élément totalement recyclable et réutilisable. Grâce notamment aux capacités liantes des argiles qui la constituent, la terre mélangée à l'eau offre des possibilités de réemploi infinies et cette faculté a contribué fortement à l'utilisation massive de ce matériau par nos ancêtres (Meukam, 2004).

2.1.3 DIVERSITE DE LA CONSTRUCTION EN TERRE

La construction en terre crue recèle de nombreux avantages, grâce aux qualités inhérentes au matériau: recyclable, performance énergétique, résistance au feu, durabilité...mais évidemment, il est nécessaire de respecter les règles essentielles de l'art de bâtir en terre crue afin de garantir les œuvres (Mostefaoui et al, 2021).

Par ailleurs, la diversité des procédés de l'architecture de terre et la simplicité de sa mise en œuvre, sont deux points forts qui lui procurent l'autonomie technologique et la diminution de l'impact tant financier qu'environnemental de la construction grâce aux économies d'énergie. Ces architectures sont ancrées dans la vision contemporaine de progrès (Salmi, S., 2014).

Parmi les techniques les plus connues, on cite: le pisé, l'adobe, (ou thob) les blocs de terre comprimée (BTC), les blocs de terre stabilisée (BTS), la terre paille et le torchis. Elles font l'objet actuellement d'un développement technologique tant sur le plan de la maîtrise et de l'amélioration des performances que sur le processus de production.

2.2 ADOBE

2.2.1 DÉFINITION

Les premiers éléments de construction préfabriqués utilisés par l'homme étaient des briques moulées en terre crue appelées « adobes » (Figure 1), on a une technologie utilisée depuis des millénaires partout à travers le monde. L'adobe est un matériau de construction fait d'un mélange de sable, d'argile, une quantité du paillé hachée ou d'autre fibres. De nature assez argileuse (jusqu'à 30 % de fraction fine), mais très sableuse, ajoutée d'eau jusqu'à obtenir un état de pâte semi ferme (15 à 30 % d'eau) (Mostefaoui et al, 2021).



Fig. 1. Moule de l'adobe

Source: Djouhri (2007)

2.2.2 TORCHIS

C'est le premier matériau composite de l'histoire (Richard, 2010). Il est composé d'une matrice plastique (terre) et de renforts fibres végétales (Figure 2). C'est le matériau de construction des habitations dès le néolithique. Il était utilisé par les Celtes pour la construction des murs. L'essor de cette technique a principalement été du XIV^e au XVI^e siècle, mais a perduré jusqu'au lendemain de la seconde guerre mondiale avec un colombage plus simple. Le torchis est une technique de construction du type ossature-remplissage. Traditionnellement, l'ossature porteuse principale est constituée de colombes de bois, complétée par un clayonnage à base de bois.



Fig. 2. Construction Torchis

Source: Heath (2011)

2.3 Pisé

Le pisé, technique séculaire de mise en œuvre de terre crue, offre des qualités d'habitabilité et d'adaptation exceptionnelles mais nécessite une attention et un suivi régulier (Rhône, A, 2010). Bien construit et protégé, le bâtiment en pisé traverse les siècles et s'adapte tout naturellement aux divers besoins des hommes. Traditionnellement, les bâtiments en pisé portent de « bonnes bottes » et un « bon chapeau ».

2.4 BAUGE

2.4.1 DÉFINITION

La bauge est un système constructif monolithique en terre crue empilée. La terre est dans un état plastique, généralement mélangée à des fibres végétales ou animales même si ça n'est pas obligatoire (Samou, et al., 2016). Les surfaces verticales sont dressées par découpe après un court temps de séchage alors que le matériau n'est pas trop dur (Mariette, 2021). Le matériau mélangé est soit empilé à la main sous forme de monticules, soit jeté vigoureusement contre le mur. La surface rugueuse est ensuite enduite de manière à obtenir une paroi lisse.

2.4.2 SAC DE TERRE

La construction en sacs de terre s'inspire de la construction en pisé: on remplit de terre compactée, des sacs de polyéthylène ou polypropylène (utilisés notamment pour le conditionnement des grains). Le mélange peut être constitué de divers matériaux comme de l'argile, du sable, du béton etc. (Djoughri, 2007).

2.4.3 TERRE COULÉE

La technique de la terre coulée peut être comparée à la technique du béton maigre coulé. Elle met en œuvre la terre à l'état de boue liquide dont la granularité est de préférence sableuse ou graveleuse (Craterre, 2006). Les avantages de cette technique sont multiples: préparation aisée du matériau, facilité de mise en œuvre et large registre d'applications, mais elle comporte également un gros désavantage: le retrait au séchage est important. La stabilisation peut néanmoins résoudre ce problème (Meukam, 2004). On peut également compartimenter les constructions afin de réduire le retrait ou alors simplement boucher les fissures après séchage lorsque celles-ci ne posent pas de problèmes structurels. Les outils utilisés pour cette technique sont les mêmes que ceux utilisés couramment pour le béton. La terre coulée permet de fabriquer des briques, des pavés et des murs, armés ou non (Guillaud, 1995) Coulée, un Béton de Terre.

2.4.4 TERRE FAÇONNÉE

La technique de la terre façonnée se met en œuvre avec de la terre à l'état plastique, sans moule ni coffrage. Cette façon de faire permet d'obtenir une large gamme de formes architecturales souvent très riches tout en réduisant la main d'œuvre et les coûts de construction (Ouedraogo, 1995). Les outils utilisés sont simples et les murs réalisés avec cette technique permettent un bon accrochage des enduits. Par contre, le contrôle du séchage et des fissurations de retrait sont complexes et les performances mécaniques du matériau sont plutôt problématiques (Millogo et al, 2016).

2.4.5 DIVERSITÉ DES BLOCS DE TERRE COMPRIMÉE

Aujourd'hui, le marché accueille une large gamme de produits de terre comprimée (Houben, 2006).

BLOCS PLEINS

Ils sont principalement de forme prismatique (parallélépipèdes, cubes, hexagones multiples, etc.). Leur usage est très varié.

BLOCS CREUX

On observe normalement de 15 % de creux, 30 % avec des procédés sophistiqués. Les évidements créés au sein des blocs améliorent l'adhérence du mortier et allègent les blocs. Certains blocs évidés permettent la réalisation de chaînages (coffrage perdu).

BLOCS ALVÉOLAIRES

Ils présentent l'avantage d'être légers mais exigent des moules assez sophistiqués ainsi que des pressions de compression plus forte que la normale.

BLOCS    EMBOITEMENTS

Ils peuvent éventuellement permettre de se passer de mortier mais exigent des moules assez sophistiqués et en général des pressions de compression plus ou moins élevées.

BLOCS PARASISMIQUES

Leur forme améliore leur comportement parasismique ou permet une meilleure intégration de systèmes structuraux parasismiques: chainage par exemple.

2.5 CONSTRUCTION EN TERRE ET DÉVELOPPEMENT

L'esprit productif adopté par les humains tout au long du 20^{  me} siècle a dominé tous les domaines de l'activité industrielle, notamment les secteurs de bâtiment. Produire plus, fut le mot d'ordre, sans tenir compte des retombées néfastes sur l'environnement naturel (Magniont, 2010). Les procédés de constructions rationalisent la construction tout en négligeant la qualité, la durabilité, l'adaptation de l'habitat avec son milieu, et ils considèrent l'utilisateur comme un consommateur passif (Benouali et al., 2011). Il faut donc se référer au développement durable. Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. Deux concepts sont inhérents à cette notion (Mostefaoui et al. 2021): Le concept de «besoins», et plus particulièrement des besoins essentiels des plus démunis, à qui il convient d'accorder la plus grande priorité; L'idée des limitations que l'état de nos techniques et de notre organisation sociale impose sur la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir.

2.6 PILIERS DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

La notion du développement durable s'appuie sur trois piliers complémentaires qui sont **l'environnement, l'économie et le social**, auxquels on pourrait ajouter le culturel: Environnement et social (des rapports sociaux dans un environnement viable); Environnement et économie (une prise en compte de l'environnement avec une approche économique viable); économie et social (un développement économique équitable).

Engager une politique de développement durable revient à faire en sorte que ces trois cercles qui se superposent au maximum (Figure .3). Par conséquent, agir en faveur du développement durable consiste à concilier au mieux le progrès économique, les conditions sociales et le respect de l'environnement.

Aménageurs, urbanistes, maîtres d'ouvrage et promoteurs doivent donc établir des compromis entre les exigences environnementales, sociales et économiques.

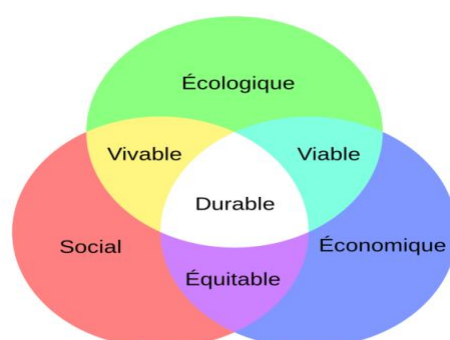


Fig. 3. Piliers du développement durable

Source: Benouali et al. (2011)

2.7 CONSTRUCTION DURABLE

La construction durable ou l'éco construction est la production d'un bâtiment en lui permettant de respecter au mieux l'écologie à chaque étape de la construction. Elle cherche à s'intégrer le plus respectueusement possible dans un milieu en utilisant au mieux des ressources peu transformées, locales, saines, et en favorisant les liens sociaux (Magniont, 2010).

Secteur du bâtiment comme un écosystème:

Ne pas dilapider le capital non renouvelable de la planète; Une transformation simple de matière en matériaux; Des déchets biodégradables.

Naissance de l'approche sérieuse du matériau terre dans la construction et son inscription dans une réflexion multidisciplinaire sur un habitat écoresponsable: Un habitat socialement équitable; Écologiquement soutenable; Économiquement viable.

La terre crue ne nécessite pratiquement pas de dépenses énergétiques. L'énergie nécessaire à la construction d'une maison moyenne de 100 m² en béton armé est suffisante pour construire l'équivalent de 50 maisons en terre crue de même surface (Benouali et al, 2021).

2.8 STABILISATION DE MATÉRIAUX TERRE

2.8.1 DÉFINITION

Le Centre des Nations Unies pour les établissements humains a défini la stabilisation d'un sol comme étant, la modification des propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec une application particulière (United Nations, 1992).

Mais la stabilisation est un problème complexe car de très nombreux paramètres interviennent. Il faut en effet connaître: les propriétés de la terre, les améliorations envisagées, l'économie du projet, les techniques de mise en œuvre de la terre choisie pour le projet et la maintenance du projet réalisé (Houben, 2006).

2.8.2 OBJECTIFS

Les principaux objectifs de stabilisation des sols sont présentés dans les travaux réalisés par (**Winterkorn, 1975; Nations Unies, 1992; Symons, 1999**): L'obtention de meilleures caractéristiques mécaniques de la terre (augmenter les résistances à la compression, à la traction et au cisaillement); La réduction de la porosité et les variations de volume (réduire le retrait et le gonflement à l'eau); L'amélioration de la résistance à l'érosion du vent et de la pluie (réduire l'abrasion de surface et la perméabilité à l'eau).

2.8.3 PROCÉDÉS

On dénombre trois procédés de stabilisation (Winterkorn, 1975).

2.8.3.1 STABILISATION MÉCANIQUE

La stabilisation mécanique est le terme général utilisé pour la stabilisation du sol par compactage. Ce procédé modifie les propriétés de la terre (la densité, la compressibilité, la perméabilité et la porosité), en intervenant sur la structure (Taallah, 2004).

2.8.3.2 STABILISATION PHYSIQUE

Il est possible de modifier les propriétés d'un sol en agissant sur sa texture, notamment en effectuant un mélange contrôlé de différentes fractions de grains telles que l'argile et le sable. Ce processus est appelé "stabilisation granulométrique". En mélangeant différentes fractions de sol, on peut obtenir des propriétés mécaniques plus stables et améliorer la résistance du sol à la compression, à la traction et au cisaillement (Mariette, 2021). Cette méthode permet également de réduire la porosité et les variations de volume du sol, ce qui peut réduire les risques de retrait et de gonflement à l'eau. La stabilisation granulométrique est une technique courante de modification des propriétés du sol, utilisée dans de nombreux projets de construction et d'aménagement du territoire (Baley, 2013).

2.8.3.3 STABILISATION CHIMIQUE

La stabilisation de la terre est assurée par l'ajout d'autres matériaux ou de produits chimiques qui modifient ses propriétés, soit du fait d'une réaction physicochimique entre les particules de la terre et le produit ajouté soit en créant une matrice qui lie ou enrobe les particules (Djelloul, 2018). On peut citer, en particulier du ciment, de la chaux, du bitume, et de sous-produits industriels. Le choix et la

quantité de matériau ou de produit chimique à ajouter dépend de la nature du sol et du degré d'amélioration de la qualité du sol souhaité (Akpodje, 1985).

Le traitement du matériau terre par des produits chimiques se fait pratiquement de deux manières (Ghoumari, 1989): Un traitement dans la masse (introduction dans la masse du sol d'une quantité minimale de stabilisant); Un traitement de surface (enduits, badigeons, hydrofuges), pour protéger la surface par imprégnation sur la partie exposée.

2.8.3.4 STABILISATION PAR FIBRES

La stabilisation par armature à l'aide de fibres est très employée de par le monde en construction en terre. Les fibres sont principalement employées pour la confection des blocs moulés par pétrissage, avec des terres plutôt argileuses présentant souvent un important retrait (Tang et al., 2010).

Les productions artisanales de briques d'adobe stabilisées à la paille sont très variées mais on connaît aussi l'emploi de fibres pour construire en torchis, en terre paille, en bauge ainsi qu'en blocs comprimés et en pisé (Houben, 2006). Pour le cas des fibres synthétiques, elles sont utilisées généralement dans le renforcement des sols pour augmenter les résistances à la compression et au cisaillement (Estabragh et al., 2011).

Dans le domaine de la construction, plusieurs types de fibres sont utilisées, et elles peuvent être classées par famille. Ainsi on peut avoir les fibres naturelles (Les fibres animales (poils; sécrétions); Les fibres minérales; Les fibres végétales) (Baley, 2013). Les fibres végétales (Des fibres des poils séminaux de graines (coton, kapok); Les fibres des tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ortie); Les fibres extraites de feuilles (sisal), de troncs (palmier), d'enveloppes de fruits (noix de coco)) (FRD, 2021).

2.8.4 L'EFFET DE LA STABILISATION PAR LES FIBRES NATURELLES SUR LES PROPRIETES DES ADOBES

L'ajout de ces fibres naturelles est un moyen de stabilisation couramment utilisé dans la fabrication des adobes et autres produits de terre, et ceci depuis des milliers d'années (Ambarka, 2010).

2.8.5 AMELIORATION DES PROPRIETES MECANQUES DES MATERIAUX EN TERRE CRUE PAR DES FIBRES VEGETALES

La terre renforcée par des fibres fait l'objet de beaucoup d'investigations par plusieurs chercheurs ces dernières années. La littérature a permis d'appréhender les réflexions déjà menées dans le sens de l'utilisation de la terre renforcée par des fibres comme matériau de construction. La majorité des auteurs sont unanimes pour reconnaître les opportunités qu'offre ce matériau de construction. De nombreuses études ont été réalisées dans ce sens. On sait que les fibres végétales ont un caractère hydrophile qui favorise l'absorption d'eau, alors que d'autres types de fibres ont un caractère hydrophobe comme le cas des fibres de polypropylène. Cette faible insensibilité à l'eau des fibres végétales constitue un point faible dans son utilisation pour la fabrication des produits en terre crue, chose qui a poussé les chercheurs à essayer d'étudier ce problème et d'évaluer son ampleur. Sallehan et Yaacob (Sallehan, 2011) ont conclu à travers les résultats des essais d'absorption d'eau réalisés dans l'étude, qu'il y a une légère augmentation de l'absorption de l'eau avec l'augmentation de la teneur en fibres de palmier.

2.8.6 MODE DE PRODUCTION DE LA PAILLE DE PENNISSETUM PURPUREUM

Des différents modes d'implantation bien que les grains de Sissongo existent, la méthode de reproduction la plus utilisée est la reproduction végétative: éclat de souche ou bouturage. Pour tous les types de reproduction du Sissongo, la distance entre les lignes est de 1m.

3 MATERIELS ET METHODES

3.1 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Cette étude est réalisée dans la ville Yabassi, située dans la Région du Littoral Cameroun et dans le Département du Nkam. La Commune de Yabassi créée en 1985, couvre une superficie de 3080 km². Elle est comprise entre 4° et 4°45 de Latitude Nord et 9°40 et 10 °30 de Longitude Est (Figure 4). La Commune de Yabassi est limitée:

- Au Sud par les Arrondissements de Dibamba et Douala III;
- À l'Est par les Arrondissements de Nkondjock et Yingui;
- Au Nord par les arrondissements de Njombé/Penja, Loum et Nlonako;
- À l'Ouest par les Arrondissements de Dibombari et Douala V.

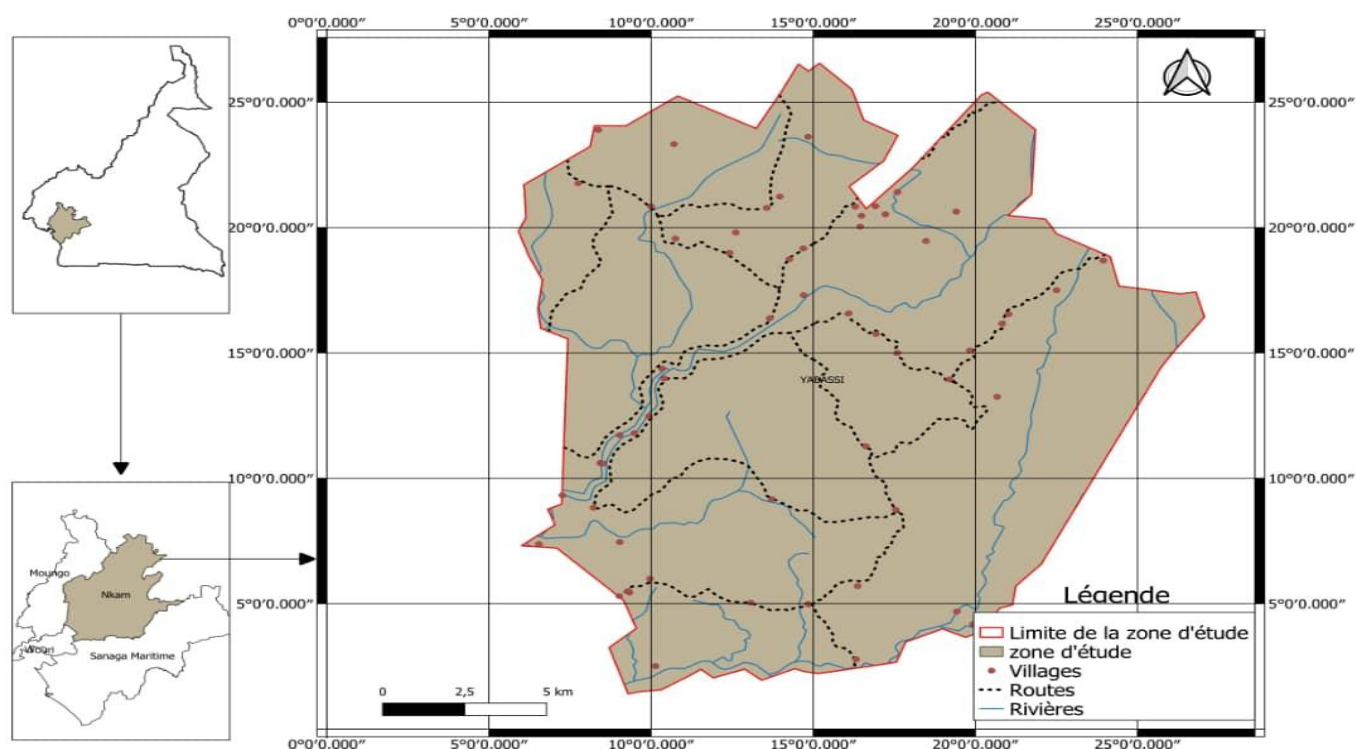


Fig. 4. Localisation de l'Arrondissement de Yabassi dans le Département du Nkam au Littoral Cameroun

3.2 CONDITION AGRO-PEDO-CLIMATOLOGIQUE, VEGETATION ET FAUNE

Le secteur d'étude est arrosé par des pluies de mousson qui ont été appelées pluies de turbulence géographique par (Suchel, 1987). Le climat est caractérisé par une forte humidité. La température varie généralement entre 23°C et 33°C, le mois le plus chaud étant celui de février. Comme dans le département du Nkam en général, l'arrondissement de Yabassi notre zone d'étude est très pluvieux. Les hauteurs annuelles de pluie se situent entre 2900 mm et 3000 mm. La saison sèche va de mi-novembre à mi-mars. Elles résultent directement des turbulences et d'ascendances dues aux inégalités du relief. Ces pluies sont généralement abondantes, de longue durée et de fortes intensités comparables à celles des pluies d'orages. Le climat du secteur d'étude est de type équatorial côtier Nord à deux saisons. On peut également parler de climat de mousson à paroxysmes pluviaux, avec une courte saison sèche allant de Décembre à Février et une longue saison pluvieuse de Mars à Novembre. Les données climatiques ont été prises sur 34 ans entre 1990 et 2024. Les vents les plus forts dont la vitesse est 2,50 m/s soufflent du nord-est et du sud plus fréquemment du Nord de la ville d'après l'annuaire statistique de la région du littoral 2019. Deux vents sont présents dans cette localité, la mousson et l'alisé, encore appelé vent de pluies. Les vents violents soufflent pendant les périodes de juin à octobre. L'air à Yabassi est humide. L'humidité moyenne annuelle est de 87,696% dont le maximum étant de 91,58 % au mois d'Août et le minimum au mois de Janvier avec une humidité de 79,72 %. Les sols sont essentiellement latéritiques à l'horizon humifère plus ou moins épais (rapport trimestriel d'activités Délégation MINFOF, 2011). Le sous-sol est argileux latéritique marqué par une prédominance des termitières et des cailloux et se transformant par endroits en sable et massif rocheux (PNDP, 2012). Ce sol est argilo- sableux dans les plaines inondables du territoire communal. Zone essentiellement forestière, la végétation de l'Arrondissement de Yabassi est une forêt dense humide. Elle est dominée par l'Azobé (*Lophira alata*), l'Ilomba (*Pycnanthus angolensis*), le frakè (*Termilia superba*) (MINFOF, 2011). De même, on y retrouve le Bubinga, le padouck, l'Iroko, le Dobenatalmi et le Morvingui; Cette végétation abrite une importante diversité faunique, objet d'une intense activité de braconnage. Les espèces présentes dans la forêt sont les éléphants, les chimpanzés, les potamochères, le pangolin, le porc épic. Il s'agit essentiellement ici des animaux intégralement protégés par la loi.

3.3 HABITAT ET CONDITIONS DE VIE

Selon le recensement général de la population et de l'habitation (ACAM, 2007), 60% de la population rurale et urbaine vit dans des habitats précaires, délabrés et construits en matériaux provisoires (planches, carabottes, et les bambous de chînes).

3.4 MATÉRIAUX, MATÉRIELS ET ESSAIS

3.4.1 SOL UTILISÉ

Le sol utilisé dans cette étude pour la production des briques de terre compressées dans la commune de si est présenté sur la figure 5.



Fig. 5. Sol utilisé pour la production des briques de terre compressées dans la commune de Yabassi

Le sol utilisé provient de Yabassi à vingt mètres derrière le garage de la commune de Yabassi à 50 cm de profondeur sous la couche organique, il est choisi sur la base de sa disponibilité et son abondance dans la région. Ce sol est de couleur jaunâtre brun et se présente sous forme des mottes compactes. Après excavation, elle est séchée au soleil jusqu'à l'état anhydre (10% d'eau) et broyée pour obtenir des poudres fines prêtes pour utilisation.

3.4.2 SISSONGO (*Pennissetum purpureum*)

Les déchets de sissongo sont mélangés à la terre pour la production des briques de terre compressées. Le site de prélèvement de sissongo, les tiges fraîches et sèches sont présentées sur la figure 6.



Fig. 6. *Sissongo (pennissetum purpureum)* utilisé dans cette étude

La figure 6 présente le site de prélèvement du Sissongo (a), le Sissongo frais fauché (b), le sissongo découpé en longueur de 03 cm puis séché au soleil pendant 03 semaines (c) et enfin rendu en fibre sec (d). Le *Pennissetum purpureum* utilisé pour notre étude provient de Yabassi, sur le long de la rive du cours d'eau du NKAM près du pont qui mène au centre-ville, ayant pour coordonner GPS 5°10'59.999"

N et 11°10'0.001" E. Le choix du site n'est pas anodin, étant données l'abondance, et son accessibilité on peut y trouver des quantités assez importantes pour la réalisation de plusieurs projets dans la fabrication des briques composite. Ces pailles de tige *Pennisetum purpureum* sont finalement découpées en morceaux de longueurs qui varient de 3 cm à 4 cm. Pour cet essai nous n'avons opté pour aucun traitement sur la paille, pour ne pas modifier ses propriétés mécaniques ou chimiques.

3.4.3 ESSAIS

Du point de vue géotechnique, il est nécessaire de réaliser les essais préliminaires qui sont d'une importance vitale. En plus de la détermination des caractéristiques physiques du sol testé, ils permettent d'identifier les états du sol. Cette partie du travail présente les matériels utilisés et les essais d'identification du sol étudié. Les essais d'identification du sol reconstitué du présent travail sont les suivants: Essai d'analyse granulométrique du sol étudié, essai de teneur en eau, essai de Limites d'Atterberg, essai de poids spécifiques des matériaux testés, essai de Proctor des sols étudiés, essai de teneur en eau des pailles des tiges de sissongo, essai de masse volumique absolue γ_s , essai de résistances à la compression des briques produites et essai de résistances à la flexion des briques produites.

3.4.3.1 MATÉRIELS UTILISÉS

Les matériels utilisés dans ce travail sont présentés sur la figure 7.



Fig. 7. Matériels utilisés dans ce travail

La figure 7 présente les matériels de la présente étude constitués d'une presse manuelle avec force maximale de 275 kN, la mise en compression de l'éprouvette cubique de 4 cm d'arête (b), la mise en flexion de l'éprouvette prismatique de 4 cm x 4 cm x 16 cm en trois points (c), moule pour production de quatre (04) éprouvettes de 4 cm x 4 cm x 16 cm (d), moule pour production d'éprouvettes cubiques de 4 cm d'arête (e) et une balance de précision.

3.4.3.2 ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE À SEC APRES LAVAGE (NF EN 933-1 ET NF EN 933-2)

L'analyse granulométrique joue un rôle déterminant dans la composition du mélange. En effet, elle permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Il consiste à faire passer un échantillon de sol à travers différent tamis de diamètre décroissant et de peser les refus et les passants de tamisage de chaque tamis pour pouvoir tracer la courbe granulométrique à fin de classer notre sol. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

3.4.3.3 TENEUR EN EAU DU SOL (NF P 94 – 049-1)

La teneur en eau d'un matériau est le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec. Cette teneur en eau (w) est donnée par l'équation 3.1:

$$W = 100 \times \frac{w_h - w_s}{w_s} \quad (3.1)$$

Où:

W : Teneur en eau (%);

W_h : Masse du matériau humide (kg);

W_s : Masse du matériau sec en kg (après 24 heures à l'étuve à la température de 105 °C).

3.4.3.4 LIMITES D'ATTERBERG (NF P 94-051 (1993))

Compte tenu de leurs structures, les argiles ont la propriété d'absorber des quantités d'eau très importantes ou de se dessécher en fonction des conditions d'humidité auxquelles elles sont soumises.

Quels que soient la nature et le type d'argile, celle-ci malaxée à des quantités d'eau de plus en plus importantes, finit par se transformer en boue, l'argile est dans un comportement liquide. Dans une situation contraire où l'argile est suffisamment desséchée les grains sont très resserrés et les liaisons deviennent intenses, et l'argile est dans un comportement solide. Entre ces deux états extrêmes, l'argile est malléable, elle a un comportement plastique. Les limites d'Atterberg ont pour but de définir les états d'humidité correspondant aux limites entre ces trois états, l'état d'humidité du sol étant exprimé par sa teneur en eau.

L'essai se fait sur une partie du matériau tamisé au tamis 0,40 mm. La teneur en eau d'un sol est le rapport entre le poids d'eau contenue dans un certain volume de sol et le poids des grains solides contenus dans le même volume. Elle s'exprime en % et a pour symbole W .

- Limite de plasticité d'un sol (W_p (%)) marque le passage du sol de l'état solide à l'état plastique.
- Limite de liquidité d'un sol (W_L (%)) marque le passage du sol de l'état plastique à l'état liquide.
- Indice de plasticité d'un sol (IP (%)), c'est-à-dire sa faculté de devenir très déformable en absorbant de l'eau est appréciée par le couple (W_L , W_p) qui dépend de la nature des minéraux argileux contenus dans le sol et de leur quantité. C'est ainsi que Casagrande a défini un diagramme dit "Abaque de plasticité de Casagrande" qui permet de classer les sols fins. L'indice de Plasticité (IP) est défini par l'équation 3.2:

$$IP = W_L - W_p \quad (3.2)$$

Où les quantités w_l et w_p sont définies précédemment.

3.4.3.5 ESSAI DE POIDS SPECIFIQUE (NF EN ISO 17892-3)

La masse volumique absolue des particules solides du sol (ρ_s) est le quotient de la masse de ces particules solides (M_s) par leur volume des solides (V_s). La masse volumique absolue est donnée par la formule 3.3:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (3.3)$$

La masse des particules solides est obtenue par pesage, le volume est mesuré au pycnomètre. L'échantillon de sol est séché à l'étuve puis pesé. Le volume des particules est déduit par pesée à l'aide d'un pycnomètre.

3.4.3.6 ESSAI PROCTOR MODIFIE (NF P 94-093, 2014)

L'essai Proctor est un essai géotechnique qui permet de déterminer la teneur en eau nécessaire pour obtenir la densité sèche maximale d'un sol granulaire ou non par compactage à une énergie fixée. Elle a pour but de déterminer les valeurs maximales de la courbe Proctor. Il consiste à humidifier un sol à plusieurs teneurs en eau et à le compacter selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérée, on détermine la densité sèche du sol et on établit la courbe des variations de cette densité sèche en fonction de la teneur en eau. D'une manière générale, cette courbe appelée courbe Proctor présente

une valeur maximale de la masse volumique sèche, elle est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau. Ce sont ces 2 valeurs qui sont appelées caractéristiques de compactage Proctor Normal ou Proctor Modifié suivant l'essai réalisé. L'énergie de compactage (EC) est donnée par la formule 3.4:

$$EC = \frac{\text{hauteur de chute} \times \text{poids de la dame} \times \text{Nb de coups} \times \text{Nb de couches}}{\text{volume total du moule}} \quad (3.4)$$

3.4.3.7 ESSAI DE TENEUR EN EAU DU PENNISSETUM PURPUREUM

La teneur en eau du Sissongo (Te %) est donnée par la formule après découpage et séchage pendant trois (03) semaines au soleil est donnée par la relation 3.5:

$$Te = \frac{Mh - Ms}{Ms} \quad (3.5)$$

Où,

Te: représente la teneur en eau du pennisetum purpureum;

Mh: Masse du matériau humide;

Ms: Masse du matériau séché pendant 03 semaines au soleil.

3.4.3.8 ESSAI DE RESISTANCE À LA COMPRESSION DES BRIQUES PRODUITES (NF P 18-400, EN 12390-1, EN 12390-2 ET EN 12390-3)

➤ Eau de gâchage

L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impureté et des sels au-delà une certaine limite, qui peuvent détériorer les propriétés du mélange (résistance en flexion, résistance en compression, la fragiliser les capacités hydrophiles et la ductilité du stabilisant bio végétale). L'eau utilisée pour la confection des éprouvettes est l'eau du robinet, propre à la consommation.

➤ Confection des blocs

Matériel spécifique

Pour la confection des éprouvettes nécessaires au programme d'essai, on a conçu un moule selon le modèle de Guettala et *al.*, (2006). Il est constitué des éprouvettes de dimensions 4 cm x 4 cm x 16 cm avec des moules prismatiques (Figure 7. d plus haut), où les éprouvettes sont fabriquées avec des matériaux locaux en utilisant plusieurs formulations. Des moules cubiques sont aussi utilisés (Figure 7.e plus haut). Pour la préparation des mélanges de cette étude, nous nous sommes basés aussi sur l'étude réalisée par, Mariette T. Adagbe (Mariette T et *al.*, 2021) sur Utilisation de la terre renforcée par des tiges de paille de riz comme matériau des éléments porteurs des bâtiments, armé avec le rônier. Dès lors nous optons pour sept dosages de tiges de paille de *Pennisetum purpureum* à savoir: 0 % (échantillons de terre témoin), 0.05 %, 0,1 %, 0,2 %, 0, 3 %, 0, 4 % et 0,5 %.

➤ Malaxage du mélange

Après avoir fait des formulations, le mélange est mis dans un récipient pour subir un malaxage manuel.

- Mélangez bien les constituants du mélange enfin d'éviter tout tassement des fibres d'un côté du mélange. Ce mélange doit se faire à sec pendant au moins une minute;
- Ajouter les 3/4 % de l'eau prévue dans le mélange à l'aide d'un éprouvette graduée;
- Bien remuer le mélange rapidement enfin d'éviter évaporation de l'eau contenu dans le mélange;
- Éviter que l'eau touche les parois du récipient;
- Verser le reste d'eau contenue dans l'éprouvette;
- Remuez à nouveau le mélange, tout en raclant les bordures du récipient.

Le malaxage de la terre et du Sissongo, la production et le séchage des briques de terre stabilisées sont illustrés sur la figure 8.



Fig. 8. *Malaxage de la terre et du Sissongo, production et le séchage des briques de terre stabilisées*

➤ Compactage des mélanges (XP P 13-901)

Les échantillons sont préalablement séchés jusqu'à 28 jours jusqu'à obtenir une masse constante, puis pesés enfin d'en déterminer la masse sèche. A noter que les éprouvettes testées sont sous la forme d'un cube de côté (4 ± 1) cm. Les mélanges sont compactés selon le mode statique à simple effet par le biais d'une presse hydraulique à commande manuelle: le plateau inférieur de la presse se déplace entraînant l'ensemble – moule + mélange + piston, le plateau supérieur reste fixe. L'opération est conduite jusqu'à l'affichage sur l'écran de lecture de la force voulue. Durant toute cette étude on a appliqué une seule force de compactage (275 kN) (force maximale de la presse).

La pression de compactage (P_c) est donnée par la relation 3.6:

$$P_c = \frac{F}{S} \quad (3.6)$$

Où:

F : représente la force de compactage de la presse hydraulique manuelle;

S : représente la surface du piston de la presse;

$S = L \times l$, (ou L et l ; représente respectivement la longueur et la largeur du piston).

3.4.3.9 ESSAI DE RESISTANCE À LA FLEXION DES BRIQUES PRODUITES (NF P 18-400, EN 12390-1, XP P 13-901, EN 12390-2 ET EN 12390-3)

Malgré que nos BTC dans le bâtiment ne soient pas vraiment sollicités en flexion, nous avons soumis les éprouvettes de chaque formulation à l'essai de traction, juste pour voir comment elles se comportent.

Les échantillons sont préalablement séchés jusqu'à 28 jours jusqu'à obtenir une masse constante, puis pesés enfin d'en déterminer la masse sèche. A noter que les éprouvettes testées ICI sont sous la forme d'un prisme de 4 cm x 16 cm. Les mélanges sont compactés selon le mode statique à simple effet par le biais d'une presse.

3.4.3.10 ESSAI DE COEFFICIENT D'ABSORPTION D'EAU PAR CAPILLARITE (ASTM-D559)

Les échantillons sont préalablement séchés pendant 28 jours jusqu'à obtenir une masse constante, puis pesés enfin d'en déterminer la masse sèche. A noter que les éprouvettes testées sont sous la forme d'un cube de côté (4 ± 1) cm. Les échantillons sont ensuite placés dans un bac permettant une mise en contact constante d'une face de la pierre avec 3 ± 1 mm d'eau (Figure 9). Une pesée de l'éprouvette est assurée au cours du temps à l'instant défini par la norme.

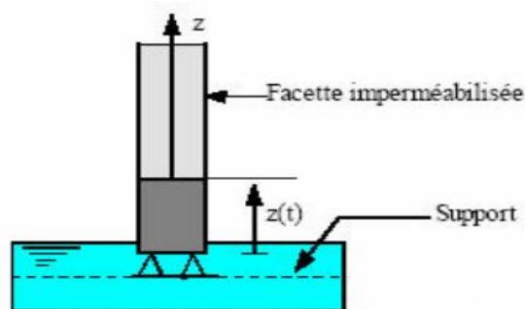


Fig. 9. Echantillon de brique compressée placé dans un bac

Dispositif expérimental de la mesure absorption d'eau par capillarité

Le coefficient d'absorption (C) est défini par l'équation 3.7:

$$C = \frac{M_x - M_0}{A} \quad (3.7)$$

Où:

M_x: Masse de l'éprouvette en une échéance donnée (kg);

M₀: Masse initiale de l'éprouvette (kg);

A: Section de l'éprouvette (m²).

4 RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les paramètres physico-mécaniques des sols déterminés dans ce travail sont l'analyse granulométrique, la teneur en eau, les limites d'Atterberg, le poids spécifique, le proctor et enfin les caractéristiques des pailles de tiges de sissongo ainsi les résistances à la compression et celles à la flexion des briques de terre avec substitution partielle avec les pailles de sissongo.

4.1 ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE

Les résultats de l'analyse granulométrique des sols utilisés dans cette étude sont présentés dans le tableau 1:

Tableau 1. Résultats de l'analyse granulométrique des sols utilisés dans cette étude

Tamis (maille) en mm	Passant (%)	Passant cumulé (%)
6,3	0	100
5	5,8	100
2,5	7,1	94,2
1,25	6,1	87,1
0,63	5,4	81
0,315	23,7	75,6
0,160	5,3	51,9
0,08	45,6	45,6

D'après le tableau 1, nous avons $D_{max} \leq 50 \text{ mm}$ et $tamisât \text{ à } 80 \mu\text{m} \geq 35\%$ ontrant selon le classement GTR (Guide des terrassements des remblais) que les sols utilisés dans le présent sont des sols fins.

4.2 TENEUR EN EAU DES SOLS UTILISES

Les valeurs de teneur en eau des sols utilisés représentant trois échantillons sont présentées dans le tableau 2:

Tableau 2. Teneurs en eau des sols utilisés dans la présente étude

Tare	Masse tare (g)	Masse totale humide (g)	Masse totale sèche (g)	Masse de l'eau (g)	Masse sol sec (g)	Teneur en eau %	Moyenne de teneur en eau %
T1	26	216	194	22	168	13.09	11,51
T2	26	258	236	22	210	10.47	
T3	26	228	208	20	182	10.98	

D'après le tableau 2, La moyenne de teneurs en eau des sols utilisés dans cette étude tourne autour de 11,51%. Valeur largement supérieure à celles déterminées par Moundom et *al.* (may 2021) de 0,02% pour les sols non compactés et 0,03% pour les sols compactés au Tchad.

4.3 LIMITES D'ATTERBERG

Les valeurs de la limite de liquidité et de la limite de plasticité sont présentées dans le tableau 3 et le tableau 4 respectivement.

Tableau 3. Valeurs de Limite de liquidité

Limite de Liquidité				
Nombre de coups	17	23	28	33
Tare N°	Z19	L9	L7	L11
Masse totale humide (g)	22,36	25,01	26,56	19,88
Masse totale sèche (g)	17,74	20,24	21,4	16,74
Masse Tare (g)	7,34	9,35	9,5	9,41
Masse d'eau (g)	4,62	4,77	5,16	3,14
Masse sèche nette sol (g)	10,4	10,89	11,9	7,33
Teneur en eau %	44,4	43,8	43,3	42,8

D'après le tableau 3, la valeur de la Limite de Liquidité (WL) du sol étudié correspondant à 25 coups, après interpolation est de 43,6, très inférieure aux valeurs de 38,54 à 64,36 trouvées Moundom et *al.* (January 2022).

Tableau 4. Valeurs de Limite de Plasticité

Limite de Plasticité				
Tare N°	L2	L1	M1	L10
Masse totale humide (g)	12,47	10,68	10,71	11,31
Masse totale sèche (g)	12,21	10,42	10,45	10,96
Masse Tare (g)	11,18	9,51	9,47	9,54
Masse d'eau (g)	0,26	0,26	0,26	0,35
Masse sèche nette sol (g)	1,03	0,91	0,98	1,42
Teneur en eau	25,24	28,57	26,53	24,65

D'après le tableau 4, la limite de plasticité qui est la moyenne des trois teneurs en eau est $W_p = 26,24\%$, très supérieure aux valeurs de 7,781 à 10,505 trouvées Moundom et *al.* (January 2022). La valeur de l'indice de plasticité (I_p) du présent sol est de 17,36%. Cette valeur étant comprise entre 15 et 40, Burmister cité dans (Verdeyen et al. 1968) propose que notre sol soit plastique. Selon Atterberg (1973), I_p plus grand que 17 confère à notre sol une plasticité élevée. Selon aussi l'indice de consistance (I_c) qui est de 1,85 supérieur à 1, d'après la norme XP P 13-901, notre sol est une argile solide. En général, une bonne terre de construction a un indice de plasticité (I_p) compris entre 16% à 28 % et une limite de liquidité (LL) entre 32 % à 46 % (Jiménez et *al.*, 2007). Au regard des essais de l'analyse granulométrique de la terre de Yabassi et les résultats de la limite d'Atterberg ($I_p = 17,36\%$ et $LL = 43,6\%$), la terre de Yabassi est une terre recommandable pour la construction des BTC.

4.4 POIDS SPÉCIFIQUES

Les valeurs de poids spécifique des sols de Yabassi sont regroupées dans le tableau 5:

Tableau 5. Valeurs de poids spécifique des sols de Yabassi

N°	Désignation	ZA	ZB
1	Poids picno+eau (g)	808,34	803,68
2	Poids picno+eau (g)	187,3	188,06
3	Poids eau (g)	621,04	615,62
4	Température (°C)	28	28
5	Densité d'eau à la T° lue	0,99	0,99
6	Volume picno	623,53	618,09
7	Poids picno+matériau (g)	429,62	450
8	Poids matériau (g)	242,32	261,94
9	Poids total (g)	1050,66	1065,62
10	Poids picno +matériau + eau (g)	953,4	961,65
11	Poids eau déplacée (g)	97,26	103,97
12	Température (°C)	28	28
13	Densité d'eau à la T° lue	0,99	0,99
14	Volume matériau (cm³)	97,65	104,39
15	Poids spécifique (g/cm³)	2,49	2,51
16	Moyenne du poids spécifique (g/cm³)	2,5	

D'après le tableau 5, le poids spécifique de ce matériau est égal 2,5 g/cm³. Valeur proche de celles déterminées dans les travaux de Moundom et *al.* (Avril 2022) sur les granulats de SAFRICAS en République Démocratique du Congo qui sont de 2,5 g/cm³ pour les sables 0/5 et de 2,63 g/cm³ pour les graviers 5/20.

4.5 PROCTOR MODIFIÉ

Les valeurs de teneur en eau et densité sèche résultant du Proctor modifié sont représentées sur la figure 10:

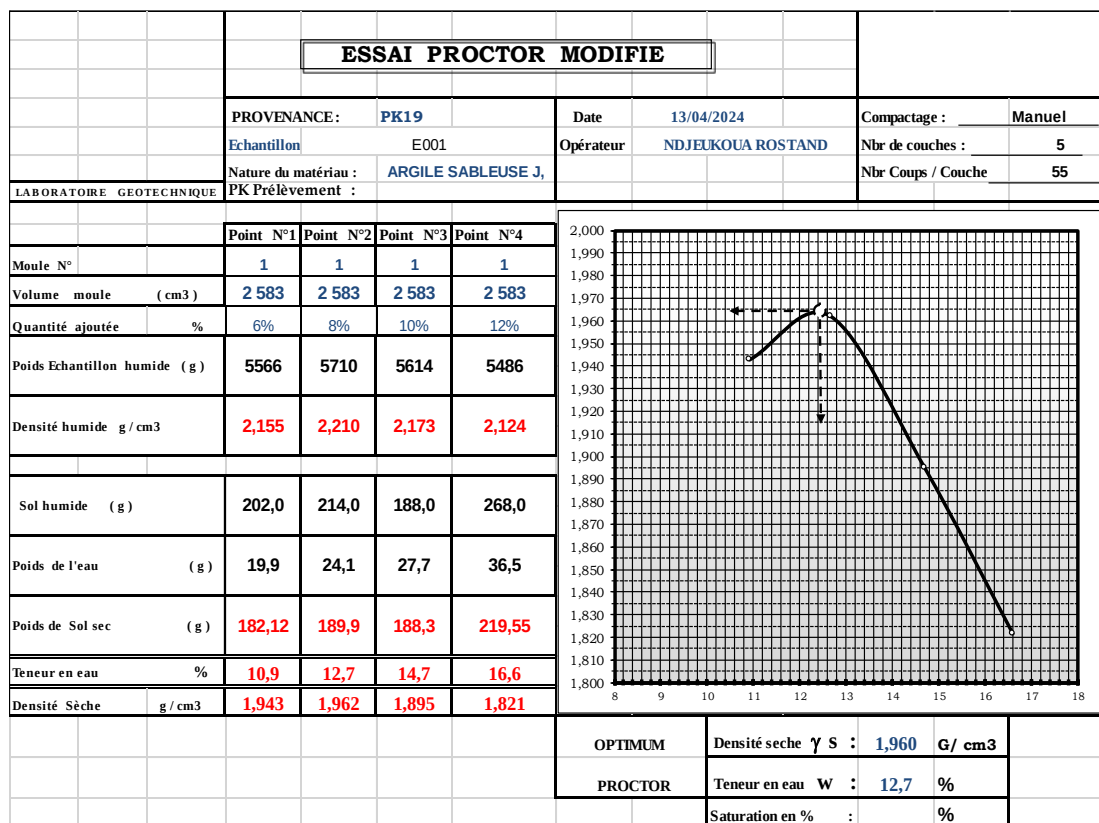


Fig. 10. Valeurs de teneur en eau et densité sèche résultant du Proctor modifié

À partir de la courbe on peut avoir les paramètres fondamentaux de cet essai (paramètres de Proctor), qui sont la teneur en eau optimale et le poids volumique sec maximum.

$$W = 12,7 \% ; \gamma = 1,960 \text{ g/cm}^3$$

La teneur en eau a une action primordiale sur le comportement des matériaux. Pour tous les matériaux testés, naturels ou reconstitués, surtout lorsqu'ils sont fins, une variation de 2 à 3 points autour de l'optimum de compactage statique entraîne toujours une chute de la résistance à sec de 30 à 50 % (Guettala et Guenfoud, 1997).

Pour obtenir une fabrication homogène, il est donc indispensable de déterminer cette teneur en eau optimale pour chaque composition.

4.6 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES PAILLES DES TIGES DE SISSONGO

La teneur eau (**Te**) extraite sur les tiges de Sissongo lors de leur séchage au soleil au bout de trois (03) semaines est de:

$$Te = 80,98 \%$$

4.7 RESISTANCES À LA COMPRESSION DES BRIQUES DE TERRE FABRIQUEES AVEC SUBSTITUTION PARTIELLE DE LA TERRE PAR LES PAILLES DE TIGES DE SISSONGO

Les échantillons des éprouvettes stabilisées avec une teneur en paille de tige de Sissongo de 0,05 %, 0,1 %, 0,2 %, 0,3 %, 0,4 % et 0,5 % et une éprouvette témoin ont été compactés aux pressions constante de 3,43MPa durant tout l'essai et les valeurs de résistances à la compression présentées sur la figure 11:

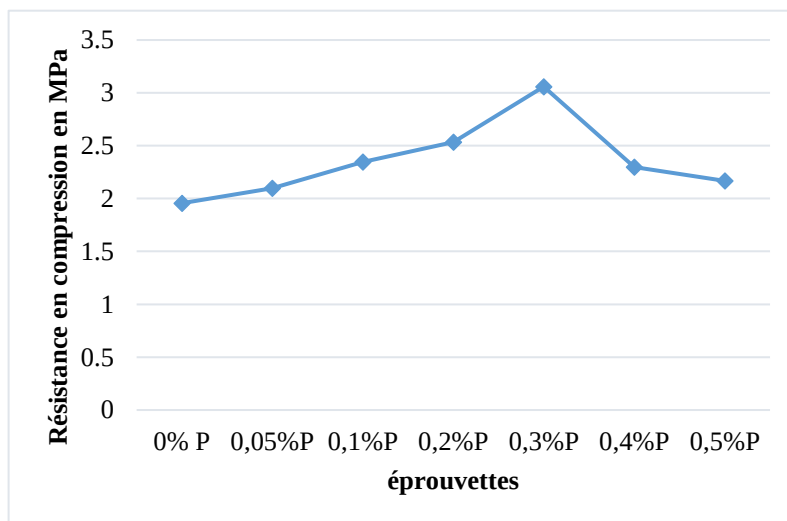


Fig. 11. Valeurs de résistances à la compression des blocs de terre stabilisés

D'après la figure 11, les résistances à la compression augmentent avec l'augmentation de pailles de tiges de Sissongo, atteignent le maximum (environ 3MPa) avec pour une stabilisation de 0,3% de pailles de tiges de Sissongo avant de chuter. Les valeurs de résistances des blocs stabilisés restent supérieures aux résistances des blocs sans stabilisation. Les résultats de compression restent relativement proches de ceux de Guettala *et al.*, (2016) qui ont travaillé sur des mélanges de terre, sable de dune et granulés de liège à différentes pressions de compactage avec 2 MPa de résistance à la compression, proches de ceux obtenus par Moundom *et al.* (January 2022) sur les briques de terre stabilisées avec les fibres de noix de palmiste dans le village Ndong avec des valeurs qui varient entre 0,32 MPa à 4,5 MPa à 28 jours et très inférieures à la valeur maximale obtenue par Katte *et al.* (2017) sur les briques produites en incorporant les boues des systèmes d'assainissement dans de l'argile calcinée. La résistance en compression moyenne d'une brique de terre se situe entre 2 et 4 MPa. Dans certains cas particuliers, briques de terre atteignent 12 MPa (ROHLEN *et al.*, 2013). La BTCS est plus résistante que la BTC. Touré *et al.* (2017) montrent une résistance en compression de 2,5 à 4 MPa pour les BTC, et de 2 à 6 MPa pour les BTCS avec 8 % de ciment. Dès lors au vu des résultats obtenus lors de l'essai en compression nous avons obtenus une résistance maximale de 3,05MPa à travers l'éprouvette contenant 0,3%P d'incorporation des pailles.

4.8 RESISTANCES À LA FLEXION DES BRIQUES DE TERRE FABRIQUEES AVEC SUBSTITUTION PARTIELLE DE LA TERRE PAR LES PAILLES DE TIGES DE SISSONGO

Malgré que nos BTC dans le bâtiment ne soient pas vraiment sollicités en flexion, nous avons soumis 1es échantillons de chaque formulation à l'essai de traction, juste pour voir comment elles se comportent. La Figure 12 présente les valeurs de la résistance maximale en flexion (R_f) des BTC, en fonction de la pression de compactage constante de 3,43 MPa.

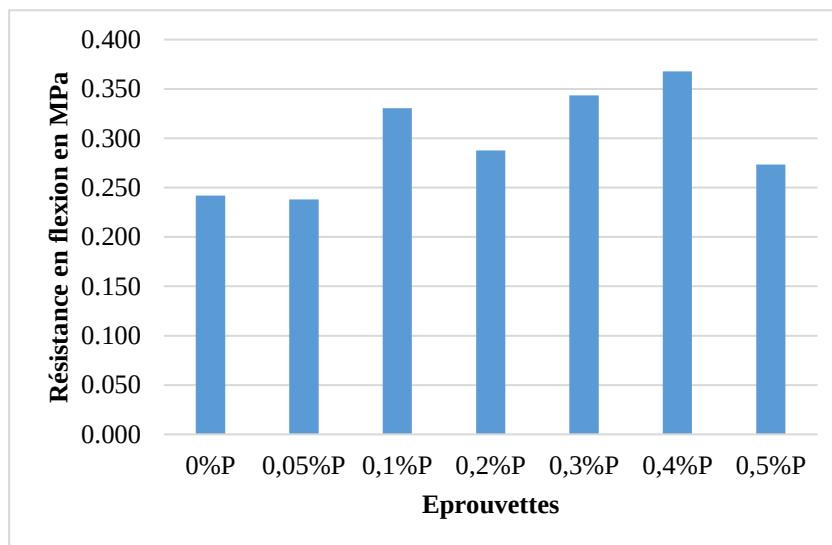


Fig. 12. Valeurs de la résistance maximale en flexion

La valeur maximale de résistance à la flexion est obtenue pour 0,4% de stabilisation avec les pailles de tiges de Sissongo correspondant à 0,370 MPa tandis que la valeur minimale est obtenue pour 0,05% de stabilisation correspondant à 0,244 MPa. La relation entre variation du taux de stabilisation et variation de la résistance à la flexion ne peut pas être établie.

4.9 ABSORPTIVITÉ CAPILLAIRE

Les résultats de l'absorption d'eau des briques par capillarité sont présentés sur la figure 13

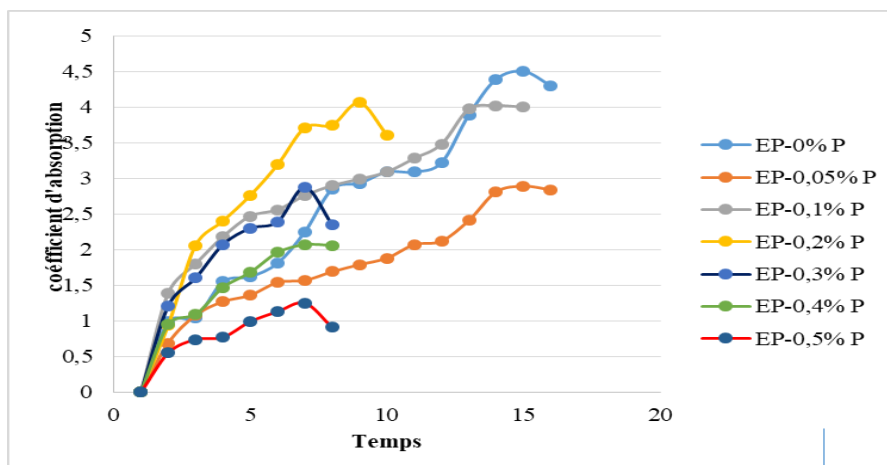


Fig. 13. Résultats de l'absorption d'eau des briques par capillarité

D'après la figure 13, les échantillons contenant respectivement 0 % et 0,05 % d'incorporation des pailles de tiges de Sissongo ont le même temps maximal d'absorption. Par contre le coefficient d'absorption des échantillons contenant 0,05 % de paille est inférieur à celui de l'échantillon témoin (0 % P); L'échantillon contenant 0,05 % paille absorbe moins d'eau par rapport à l'échantillon témoin, car son coefficient d'absorption maximal est inférieur à celui de l'échantillon témoin 0 % P; Pour les échantillons contenant 0 % à 0,1 % le temps d'absorption maximal sont assez élevés par rapport autres échantillons; De 0,3 % à 0,5 % d'incorporation de pailles de sissongo les échantillons ont un temps d'absorption très bas et un coefficient d'absorption réduit; Les échantillons contenant 0,3 % et 0,5 % d'incorporation de pailles ont un temps d'absorption très court autrement dit elles absorbent très vite de l'eau et se dégradent très

rapidement par rapport autres éprouvettes; Les éprouvettes contenant 0,3 %, 0,4 % et 0,5 % d'incorporation de paille on le même temps maximal d'absorption.

5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Afin de répondre aux objectifs de développement de la localité de Yabassi, les politiques sont fortement orientées vers la valorisation des matériaux locaux tels que les sous-produits agricoles. Le Cameroun intègre cette importante préoccupation dans ses stratégies de développement, avec à la clé la prise en compte du volet protection de l'environnement. C'est dans ce contexte que notre étude propose la mise au point des briques de terre comprimées (BTC) stabilisées à la paille de sissongo (*Pennisetum purpureum*). L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'effet de l'utilisation des pailles végétales, notamment les pailles de sissongo sur les propriétés mécaniques (BTC) stabilisées à la paille de sissongo (*Pennisetum purpureum*) et aussi la sensibilité à l'eau de ces BTC. Les essais (d'analyse granulométrique, de teneur en eau, de Limites d'Atterberg, de Proctor Modifié, de poids spécifique) ont été réalisés sur les sols utilisés à Yabassi; L'essai de teneur en eau réalisé sur le sissongo; Les essais (de résistance à la compression, à la flexion, d'absorption d'eau) ont été réalisés sur les BTC; Pour les formulations, les taux d'incorporation du sissongo dans le sol de 0%, 0,05 %, 0,1 %, 0,2 %, 0,3 %, 0,4 % et 0,5 % du poids du mélange sec ont été testés en se basant sur des études antérieures ayant utilisé les mêmes taux pour l'incorporation de la paille de riz dans la fabrication des briques de terre et une contrainte de compactage 3,43 MPa (contrainte maximale de la presse hydraulique). Les résultats ont montré que l'ajout de ces matériaux à 0,3 % de paille a donné une résistance maximale en compression de 3,058 MPa et a contribué à l'amélioration de la résistance mécanique des briques de 1,1 MPa par rapport à l'éprouvette témoin 0% de paille (1,95MPa). Malgré que nos BTC dans le bâtiment ne soient pas vraiment sollicitées en flexion, nous avons soumis 1es éprouvettes de chaque formulation à l'essai de traction, la contrainte maximale en flexion enregistrée est celle l'éprouvette contenant 0,4% de paille avec une contrainte de 0,367 MPa. Concernant la sensibilité à l'eau, les éprouvettes contenant 0 % à 4% de sissongo ont des coefficients d'absorption respectifs 4,5 et 2,06 qui se situent dans la plage recommandée (2 à 15). Le temps d'absorption par capillarité est plus important à 0 % de pailles (30s) que celle contenant 0,3 % de pailles avec une durée maximale de 14s. Les recommandations ont été faites pour l'utilisation de ces BTC stabilisées avec les pailles de sissongo dans la construction compte tenu des avantages environnemental, économique et social.

REFERENCES

- [1] Ahmed, A. S., (2012). Performances thermiques du matériau terre pour un habitat durable des régions arides et semi-arides: cas de Timimoune. Mémoire magister, université Tizi Ouzou. Algérie. Pp 46-48.
- [2] Baley, C, (2004). Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. Techniques de l'ingénieur AM6 (AM5130). Pp 1-12.
- [3] Benouali, H., Brara, A., Mahdad, M., Mokhtari, F., (2011). Caractérisation thermo physique et suivi Thermique de deux bâtisses réalisées en blocs de terre comprimés, Actes de la 29^{ème} rencontre de l'Association Universitaire de Génie Civil (AUGC), Tlemcen p.265, pp 29-31.
- [4] Benhaoua, W., 2021.Stabilisation des sols, durabilité des blocs et constructions en Terre (Thèse de doctorat). Université de Blida 1, Alg2rie. pp 48-49.
- [5] Bruno, A.W., Gallipoli, D., Perlot. C, Mendès. J, et Salmon.N., (2015). Briques de terre crue: procédure de compactage haute pression et influence sur les propriétés mécaniques. 33èmes Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, Anglet.
- [6] Chaib, H., 2017. Contribution à l'Etude des Propriétés Thermo-Mécaniques des Briques en Terre Confectionnée par des Fibres Végétale Locale. (Cas de la ville de Ouargla), pp: 8-10.
- [7] Djelloul, R., (2018). Thèse de doctorat: Influence de l'ajout de chaux et de ciment sur les propriétés physico-mécaniques d'une argile naturelle de la région d'Oran en vue de sa valorisation en construction routière. Université d'Oran. Algérie.
- [8] Djouhri, M., (2007). « Confection d'une brique à base de sable de dune » mémoire magister, Université de Ouargla.
- [9] Estabragh AR, Bordbar AT, et Javadi A., (2011). Mechanical Behavior of a Clay Soil Reinforced with Nylon Fibers. GeotechGeolEng, 29 pp: 899–908.
- [10] FRD., (2012). Fibres et renforts végétaux Solutions composites, Fibres Recherche Développement, Troyes – France.
- [11] Guettala A., Abibsi A., et Houari H., (2006). Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure. Construction and Building Materials; 20 (3) pp: 119–27.
- [12] Guettala M. et Guenfoud M., (1997). Béton de terre stabilisé propriétés physico-mécaniques et influence des types d'argiles. La technique moderne 1-2 pp: 21-26.
- [13] Houben H., et GUILLAUD H., (2006). Traité de construction en terre. CRATerre, Edition Parenthèse, Marseille, France, p 335.
- [14] Jehanne., (2015). Construction en Terre Crue: Disposition qualitative, constructives et architecturales, Mémoire de Master en Ingénieur Civil Architecte, pp: 17-20.
- [15] Katte Y.V., Seukep N. J.F., Moundom A., Wouatong L. S. A. and Kamgang K.B.V., (2017). The Effect of Partial Replacement of Waste Water Treatment Sludge on the Properties of Burnt Clay Brick. International Journal of Civil Engineering and Technology, Volume 8, Issue 6, June 2017, pp. 567-583.

- [16] Magniont, C., (2010). Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un éco matériau de construction à base d'agroressources (Thèse de doctorat). Université Toulouse III.
- [17] Mariette, T., Adagbe., (2021). Utilisation de la terre renforcée par des tiges de paille de riz comme matériau des éléments porteurs des bâtiments armés avec le rônier (Thèse de doctorat). Pp34-36.
- [18] Meukam, p., (2004). Caractérisation des Matériaux Locaux en vue de l'Isolation Thermique de Bâtiment (Thèse de doctorat). Université de Yaoundé I, Cameroun. PP: 5-6.
- [19] Millogo Y., Aubert J.E., SERE A.A., FABBRI A., et MOREL J.C., (2016). Earth blocks stabilized by cow-dung. Materials and structures, 49, pp: 458–459.
- [20] Mostefaoul, Salima., et Derder Karima., (2021). Etude des comportements de la terre crue stabilisée à l'aide des fibres. Université Ibn Khaldoun de Tiaret., pp 85.
- [21] Moundom A., Tangka K. J., Kongdi I., Tamo Tatietse T., (2021). Study of Some Physical Parameters of Soils Subjected to Compaction by Agricultural Tractors in Mayo Kebbi East Region (Chad). International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology (IJARSET), Volume 8, Issue 5, May 2021, pages: 17308-17317.
- [22] Moundom A., Muhatikani T. and Maheshe Bishikwabo O., (2022). Physico-mechanical properties of concrete made with the most used types of cements admixed with Polycarboxylate superplasticizer in the city of Goma, Democratic Republic of Congo (DRC). International Journal of Engineering and Techniques (IJET), Volume 8, Issue 2, April 2022, pp. 55-68.
- [23] Moundom A., Katte Y. V., Abanda Ngono B. and Amboko Muhiwa B., (2022). Physico-mechanical properties of stabilized mud bricks with palm nut fibres in Ndong village, Mfou district, Mefou -Afamba division in the Centre Region of Cameroon. International Journal of Engineering and Techniques (IJET), Volume 8, Issue 1, January 2022, pp. 70-87.
- [24] NF EN 933-1, (2012). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 1: détermination de la granularité – Analyse granulométrique par tamisage. AFNOR, Paris.
- [25] NF EN 933-2, (1996). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 2: détermination de la granularité – Tamis de contrôle, dimensions normales des ouvertures. AFNOR, Paris.
- [26] NF EN 12390-1, (2001). Essais pour béton durci – Partie 1: forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules. AFNOR, Paris.
- [27] NF EN 12390-2, (2001). Essais pour béton durci – Partie 2: confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance. AFNOR, Paris.
- [28] NF EN 12390-3, (2003). Essais pour béton durci – Partie 3: résistance à la compression des éprouvettes. AFNOR, Paris.
- [29] NF P EN ISO 17892-3, (2015). Sols: Reconnaissance et essais géotechniques –Essais de Laboratoire sur les sols-Partie 3: Détermination de la masse volumique des particules solides. AFNOR, Paris.
- [30] NF P 18-400, (1981). Bétons-Moules pour éprouvettes cylindriques et prismatiques. AFNOR, Paris.
- [31] NF P 94-049-1, (1996). Sols: Reconnaissance et Essais-Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux-Partie 1: Méthode de la dessiccation au four à micro-ondes. AFNOR, Paris.
- [32] NF P 94-051, (1993). Sols: Reconnaissance et Essais-Détermination des limites d'Atterberg-Limite de liquidité à la coupelle-Limite de plasticité au rouleau. AFNOR, Paris.
- [33] NF P 94-093, (2014). Sols: Reconnaissance et Essais-Détermination des références de compactage d'un matériau-Essai.
- [34] Proctor Normal-Essai Proctor modifié. AFNOR, Paris.
- [35] Richard P., (2010). Adobe., mémoire Maître en environnement, Université de Sherbrooke, Canada.
- [36] Rhone A., (2010). « Le pisé » www.ageden.org.
- [37] Salmi.S., (2014). La Construction en pisé entre performances énergétiques et perception des usagers cas du village kabyle Ait Itchir.
- [38] Taallah, Bachir, (2004). Etude de comportement physique-mécanique de bloc de terre comprimée avec fibre 'thèse de doctorat, université Mohamed Khider biskra.
- [39] Tang C, Shi B, Zhao L., (2010). Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. Geotext Geomembr; 28: 54–62.
- [40] XP P 13-901, (2022). Briques et Blocs de terre crue pour murs et cloisons-Définitions-Spécifications-Méthodes d'essai-Conditions de réceptions. AFNOR, Paris.

Assessment of species richness and relative abundance of medium and large mammals within and outside of Moukalaba-Doudou National Park, Gabon

Akomo-Okoue Etienne François¹, Mindonga-Nguelet Fred Loique¹, and Nguema-Ngomo Quentin^{1,2}

¹Institut de Recherche en Ecologie Tropicale (IRET-CENAREST) Po Box 13354 Libreville, Gabon

²Faculty of Science, Université des Sciences et Technique de Masuku (USTM) Po Box 913 Franceville, Gabon

Copyright © 2026 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Animal populations monitoring within and outside the park is important for identifying mammal communities but also for designing conservation plans. We assessed the diversity and the relative of medium and large mammals in and outside of Moukalaba-Doudou National Park, Gabon, using camera traps. The cumulative time for all functional camera traps was 3060.42 camera-days in the park and 2880.68 in the buffer area. Overall, of 30 medium and large mammal species and 3 rodent species were detected in the park, whereas 25 species and 3 rodent species were detected in the buffer area. Moreover, the forest dwelling species were more abundant in the park than in the buffer area ($p = 0.018$) and most of savanna dwelling species were more abundant in the buffer area ($p < 0.001$). In both areas, duiker species were more abundant than other detected species. However, the ratio red/blue duikers revealed a high hunting pressure in the buffer area. We succeed to identify at least 5 groups of western gorillas with more than 7 individuals within the park and 3 in the buffer area. Implementing a habituation process in the buffer area will require prior consultation with the local populations to ensure they refrain from hunting. Gorilla habituation could be used as a stool of protecting biodiversity but also of enhancing the benefits to the communities through community-based ecotourism.

KEYWORDS: Moukalaba-Doudou, Buffer area, camera trap survey, species richness, western gorilla habituation.

1 INTRODUCTION

Global biodiversity is experiencing a crisis described as the sixth mass extinction, caused primarily by human activities [1]. In order to reduce this decline in biodiversity, several countries have created National Parks which are the refuges for many animal communities [2]. Gabon, a Congo Basin country, established thirteen terrestrial national parks in 2002, covering approximately 11% of its territory, and 20 marine protected areas in 2017, representing approximately 26% of its exclusive economic zone [3]. Each National Park is surrounded by a buffer zone which can be used for customary purposes by local populations but also for mining and logging. However, most of the investigations on mammalian diversity and abundance are targeted within the National Parks of the country [4], but outside of the protected areas records and conservation status of the different species of mammals are poorly known. Information on local fauna composition is essential for future conservation strategies and can provide basic knowledge for more complex ecological and biogeographical studies [5].

Moukalaba-Doudou National Park (hereafter, Moukalaba) is the third largest terrestrial park in Gabon, with an area of 4,496 km² and is comprised of several types of vegetation including savannah. This park inhabits at least 40 species including 11 Primates, 13 Carnivora, 10 Ungulates, and seven other taxa [4], [6], [7], [8], [9]. The largest populations of great apes and blue duikers in central African forests occur in Moukalaba [10], [11]. In contrast, we have very little or no information on its faunal richness in most of the buffer zones of the park. In order to maintain the role assigned to this protected area, it is crucial not only to know the diversity of the species present within the park but also in their buffer zones for understanding the influence of human practices on these animal communities [12].

On the other hand, in Moukalaba, a long-term socioecological study of great apes through wild western gorilla habituation began in 2001, and a group of gorillas has been habituated [13], [14]. This group, despite being mainly focused on research, is the subject of selective ecotourism [15]. Based on this experience, the park authorities want to establish sustainable ecotourism through gorilla viewing. It is therefore essential, for sustainable ecotourism and according to IUCN standards, to habituate at least two groups of gorillas

within or outside the park [16]. Surveying medium and large mammals can provide information on the potential western lowland gorilla groups inhabiting those target areas.

Thus, in order to preserve and increase biodiversity conservation actions and to evaluate western lowland gorilla groups potential within Moukalaba and its buffer area, it appears crucial to complete and update data on the diversity, abundance, and distribution of mammals. The main objective of this study was to determine the species richness, relative abundance and spatial distribution of medium-sized and large mammals in the park and the buffer area.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 STUDY AREA

The study was conducted in the northeastern part of the Moukalaba-Doudou National Park which is located in the southwest of the Republic of Gabon, and in the village of Doussala, on the opposite bank of the Moukalaba River, which forms the boundary of the MDNP (Figure 1). The Moukalaba River's width varies from 20 to 40 m splits the park and the buffer zone. The vegetation type in the Moukalaba area is savanna mosaic forest with a mixture of primary forest, secondary forest, riverine forest, mountain forest, and savanna [17]. The buffer area of the park is also a savanna mosaic forest with savannas larger than in the park (Figure 1). The annual rainfall around the study area ranges from 1.176 to 2.043 mm and the dry season is mainly from May to September, and the rainy season is from October to April [10]. The surrounding population within the buffer area is estimated to around 30 people and uses this area for fishing, shifting cultivation and hunting [15], [18].

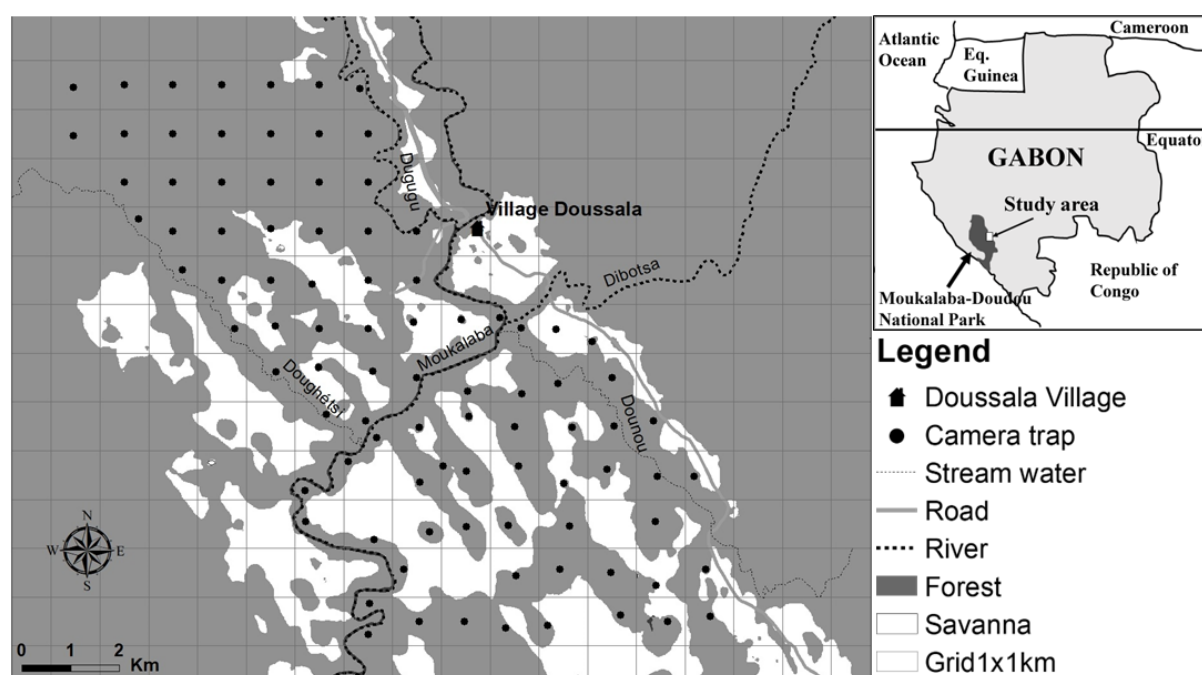


Fig. 1. Study area and camera trap locations within and outside Moukalaba-Doudou National Park

2.2 MEDIUM AND LARGE MAMMAL SURVEY

We conducted a camera trap survey within and outside of Moukalaba during the dry season from mid-June to mid-September in 2022 and 2023 respectively. We used motion-triggered camera traps DIGITNOW BR693 Surveillance Camera with 8MP CMOS Sensor. Before deploying cameras, each study area was previously stratified in 1km x 1km grid covering around 60 Km² (Figure 1). The camera traps were therefore placed 100 m around the center of each grid. However, to avoid sunlight, we placed the cameras at the forest edge or in small fragments of forest within the savannah. The precise positioning of the cameras was determined by the presence of trees suitable for placing cameras and the presence of animal tracks.

We placed 46 camera traps within the park and the buffer area. Each camera was mounted around 50 centimeters above the ground on a tree without baits. The cameras were angled parallel to the animal trail facing north or south. We programmed each camera to "video mode," which enables the capture of a short 30-second video clip with the capture interval being five seconds. Because gorillas

can sometimes stay for several hours in front of the same camera, the data were filtered to exclude videos of the same species at the same station within a period of 1 hour to ensure that the events were independent [12], [19].

2.3 DATA ANALYSIS

We identified the animal species in the videos following the nomenclature of Kingdon et al. (2013) [20] and Nakashima (2015) [6]. We were unable to discriminate *Cephalophus ogilbyi* and *C. callipugus*; and *Genetta cristata* and *G. servalina*. In the present study, we treated the two red duikers and the two genets as single species. All statistical analyses were performed using R version 1.3.1093 (R Core Team 2024). P values less than 0.05 were considered statistically significant (* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$). To examine whether the number of recorded species reached an asymptote, we plotted a species accumulation curve, using Kindt's exact method in the R package "vegan" [21]. We drew separate accumulation curves for each study site. For each species, we calculated the relative abundance index (RAI) as the number of captures divided by the sampling effort (i.e. number of camera days) multiplied by 1000, indicating the number of captures per 1000 days of camera trapping [11]. The species richness and diversity of medium and large mammal species in each area type were computed using the Shannon–Weaver Diversity Index [22].

Additionally, we computed the naïve occupancy as the number of camera trap locations at which we detected each species divided by the total number of camera trap locations. We did not consider an unidentified species for analysis to avoid unnecessary bias in species level estimation of RAI and naïve occupancy. A one-way analysis of variance with Tukey HSD multiple comparisons was utilized to test the differences between the relative abundance of each species across study sites. Finally, to identify the number of potential western lowland gorilla groups suitable for habituation within the study area, we selected the event including at least 7 individuals [23] and we assumed that a group is different from another if the distance between the camera traps that detected them is at least 3 km.

3 RESULTS

3.1 SAMPLING COVERAGE

We carried out a camera trap survey at 92 locations within and outside Moukalaba and 38 and 35 were functional respectively. Among the 19 non-functional cameras in this study, African forest elephant (*Loxodonta africana cyclotis*) broke 11 (Park 4; buffer area 7) and chimpanzee (*Pan troglodytes troglodytes*) 5 (Park 4; buffer 1). The cumulative time for all functional camera traps was 3060.42 camera-days in the park and 2880.68 in the buffer area. The species accumulation curve is saturated for each sampling area (Figure 2). This suggested that the camera traps captured the majority of terrestrial species inhabiting each area during the sampling period.

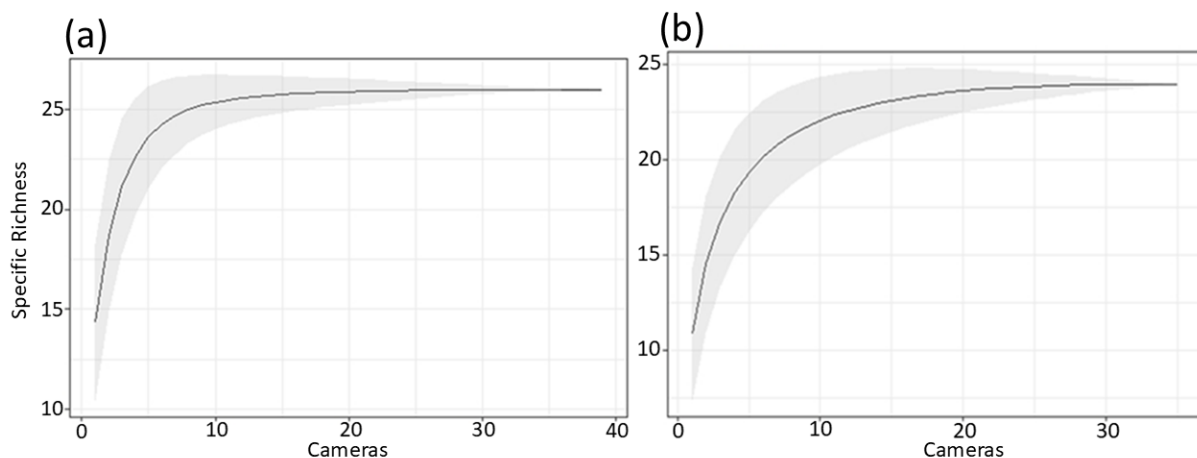


Fig. 2. Species accumulation curves for the two survey areas. (a) In the park and (b) in the buffer area. The black line represents the mean accumulation curve of species while the lighter shading shows on standard deviation around this mean using Kindt's exact method [21]

3.2 SPECIES RICHNESS, RAI AND NAÏVE OCCUPANCY

We succeed to identify 33 mammal species belonging to six taxonomic groups (5 Primates, 11 Carnivora, 10 Ungulates, 3 Pholidota, 3 Rodentia and 1 Proboscidea) across the entire study area. The number of detected species differed between the two areas, with 33 species detected within the park and 28 species within the buffer area (Table 1). We recorded Egyptian mongoose (*Herpestes ichneumon*), African golden cat (*Profelis aurata*), sitatunga (*Tragelaphus spekii*), tree pangolin (*Uromansia tetradactyla*) and African palm civet (*Nandinia binotata*) in the park only. The highest species diversity of the medium and large mammals was recorded in the park (H'

= 1.96) than in the buffer area ($H' = 1.18$). Moreover, among detected species in both target areas, two have been categorized as endangered, nine as vulnerable, two as near threatened, and 20 as least concern by the IUCN Red List of threatened species (Table 1).

Table 1. Overview of species identified within and outside Moukalaba-Doudou Park based on a total of 3060.42 and 2880.68 camera days respectively. Indicated is the number of captures of a given species per 1000 camera days (relative abundance index; RAI) and the proportion of locations at which a species was recorded (naïve occupancy) as well as in the park and the buffer area

Species		RAI		Naïve occupancy		Animal per event
		Moukalaba	Buffer area	Moukalaba	Buffer area	
Primates						
Central chimpanzee ^{EN}	<i>Pan troglodytes troglodytes</i>	21.23	11.80	0.63	0.60	1–8
Western gorilla ^{CR}	<i>Gorilla gorilla gorilla</i>	17.64	8.33	0.58	0.48	1–16
Mandrill ^{VU}	<i>Mandrillus sphinx</i>	2.94	1.04	0.24	< 0.1	1-20
Red-capped mangabey ^{VU}	<i>Cercocebus torquatus</i>	10.45	5.90	0.58	0.48	1-14
Moustached monkey ^{VU}	<i>Cercopithecus cephus</i>	7.19	5.20	0.47	0.31	1-12
Carnivora						
Black-legged mongoose	<i>Bdeogale nigripes</i>	10.45	8.33	0.47	0.48	1
Long-snouted mongoose	<i>Herpestes naso</i>	18.95	12.49	0.63	0.60	1–2
Egyptian mongoose	<i>Herpestes ichneumon</i>	< 1	–	< 0.1	–	1
Marsh mongoose	<i>Atilax paludinosus</i>	2.94	1.73	0.24	0.14	1
Unidentified mongoose		5.55	3.47	0.24	0.14	1
African palm civet	<i>Nandinia binotata</i>	<1	–	< 0.1	–	1
African civet	<i>Civettictis civetta</i>	8.17	5.90	0.58	0.37	1
Servaline genet	<i>Genetta servalina</i>	26.14	20.83	0.81	0.83	1–2
Rusty-spotted Genet	<i>Genetta maculata</i>	4.24	3.47	0.28	0.14	1
African linsang	<i>Poiana richardsonii</i>	< 1	< 1	< 0.1	< 0.1	1
Unidentified genet		3.92	2.08	0.24	0.14	1
Leopard ^{VU}	<i>Panthera pardus</i>	7.19	5.90	0.52	0.42	1
African golden cat ^{VU}	<i>Profelis aurata</i>	1.31	–	< 0.1	–	1
Cetartiodactyla						
Red river hog	<i>Potamochoerus porcus</i>	98.23	43.32	0.75	0.68	1–23
Water chevrotain	<i>Hyemoschus aquaticus</i>	18.95	29.50	0.40	0.48	1–2
African buffalo	<i>Syncerus caffer nanus</i>	16.66	24.30	0.45	0.77	1–10
Sitatunga	<i>Tragelaphus spekii</i>	<1	–	< 0.1	–	1
Bush buck	<i>Tragelaphus scriptus</i>	7.14	11.80	0.45	0.77	1
Blue duiker	<i>Philantomba monticola</i>	325.51	274.56	1	1	1–3
Bay duiker ^{NT}	<i>Cephalophus dorsalis</i>	37.20	18.55	0.45	0.48	1
Peters’s/Ogilby’s duiker	<i>Cephalophus callipygus/ogilbyi</i>	248.16	95.82	0.75	0.77	1–2
Yellow-backed duiker ^{NT}	<i>Cephalophus silvicultor</i>	76.73	48.95	0.75	0.64	1
Waterbuck	<i>Kobus ellipsiprymnus</i>	18.45	28.93	0.45	0.77	1–6
Pholidota						
Giant pangolin ^{VU}	<i>Smutsia gigantea</i>	3.92	2.43	0.34	0.23	1
Tree pangolin ^{VU}	<i>Phataginus tricuspis</i>	< 1	–	< 0.1	–	1
Long-tailed pangolin ^{VU}	<i>Uromanis tetradactyla</i>	1.96	< 1	0.15	< 0.1	1
Proboscidea						
African forest elephant ^{VU}	<i>Loxodonta africana ciclotis</i>	148.76	178.98	1	1	1–18
Rodentia						
Brush-tailed porcupine	<i>Atherurus africanus</i>	15.35	24.99	0.56	0.64	1–2
Giant pouched rat	<i>Cricetomys spp</i>	5.90	10.75	0.34	0.42	1
Cane rat	<i>Thryonomys spp.</i>	2.29	4.57	0.15	0.23	1–4

In both areas, ungulates were the most frequently observed taxonomic group, followed by forest elephant and rodents. The blue duiker (*Philantomba monticola*) was the most frequently captured species, followed by the Peters's/Ogilby's duiker (*Cephalophus callipygus/ogilbyi*), the forest elephant and the red river hog (*Potamochoerus porcus*). However, among the 21 most frequently observed species ($RAI \geq 0.5$ for 100 camera days and $RAI \geq 5$ for 1000 camera days [24]) in both areas, 14 species showed higher RAIs in the park as compared to the buffer area (Wilcoxon test; $N = 14$ species, $p = 0.018$). These included four primate species, as well as two mongoose

species, four forest duikers, the red river hog, the leopard (*Panthera pardus*), African civet (*Civettictis civetta*) and the servaline genet (*Genetta servalina*). In contrast, only 7 species showed higher RAls in the buffer area compared to the park (Wilcoxon test; $N = 7$ species, $p < 0.001$). These included the water chevrotain (*Hyemoschus aquaticus*), the bushbuck (*Tragelaphus scriptus*), the waterbuck (*Kobus ellipsiprymnus*), the African buffalo (*Syncerus caffer nanus*), the elephant and three rodent species.

A maximum score of naïve occupancy was 1 in both areas, which corresponds to detection on all functional locations. Only the blue duiker and the elephant achieve this score. However, we found some species on more locations in the buffer area than within the park. Bushbuck, waterbuck, brush-tailed porcupine (*Atherurus africanus*), giant pouched rat (*Cricetomys spp*) as well as cane rat (*Thryonomys spp.*) were detected at more locations in the buffer area as compared to the park (Table 1).

3.3 ANIMAL GROUP SIZES

We counted the largest number of individuals per camera event for the red river hog (26 animals), followed by the mandrill (*Mandillus sphinx*) (20), forest elephant (18), western lowland gorilla (16), red-capped mangabey (*Cercocebus torquatus*), Moustached monkey (*Cercopithecus Cephus*) (12), forest buffalo (10), chimpanzee (8), waterbuck (6), cane rat (4) and blue duiker (3) (Table1). In the specific case of great apes, although the relative abundance of chimpanzee was significantly higher with that of western lowland gorilla in both sides ($p < 0.001$), the western lowland gorilla showed a higher number of group size (Table 1). We succeeded to identify at least 5 groups with more than 7 individuals within the park and 3 in the buffer area (Figure 3).

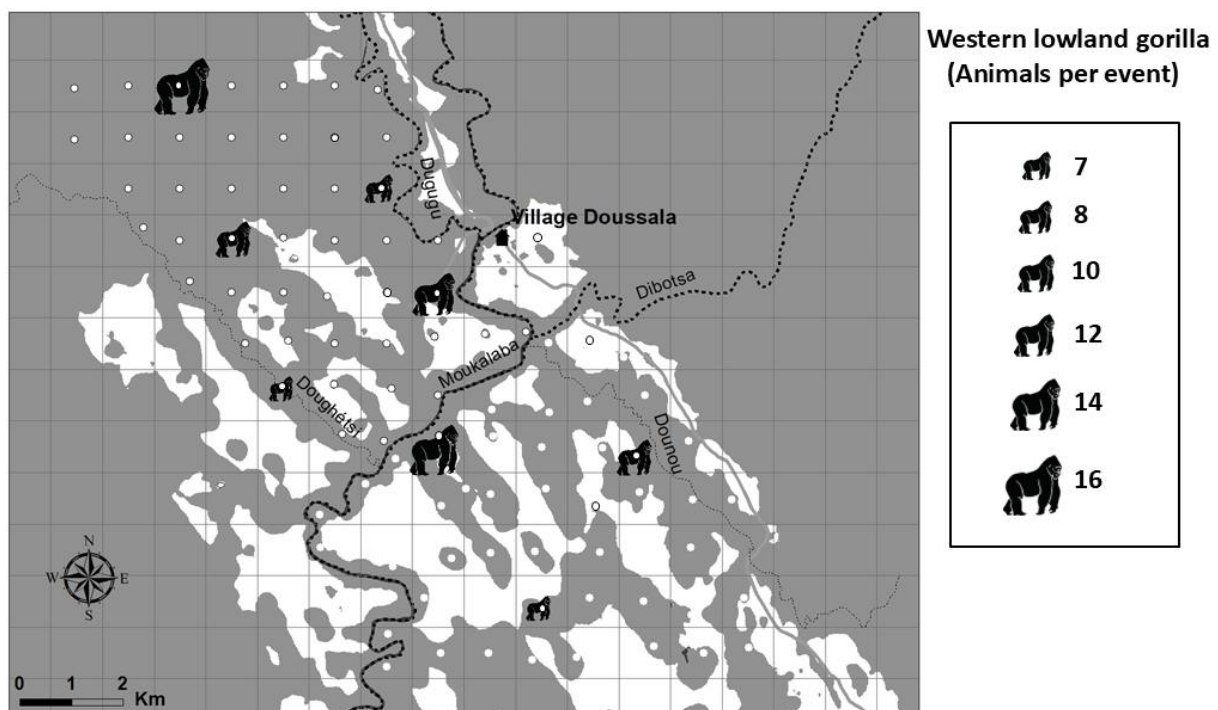


Fig. 3. Location of the western lowland gorilla groups with at least 7 members in and outside the national park

4 DISCUSSION

In this study, a total of 30 medium and large mammal species and 3 rodent species were detected in Moukalaba. Previously, using camera traps, 29 species of large to medium-sized mammal have been reported to occur in the park across the same target area [6]. Only one species, the sitatunga, was not detected in the previous study by camera trap but has been observed within the target area [6], [7]. Beyond species richness, the composition of the detected wildlife community suggests a low level of disturbance. The sitatunga is an antelope species adapted to the dense swamp and marsh forests [25]. Nakashima conducted mammal's inventory in 2015 during a total of 4165 camera-days and across several types of vegetation including savanna, young and old secondary forests and swamp forest [17]. The abundance of sitatunga may be naturally very low within the target area and could be detected occasionally, as might be the case in our study. Ecologically, the observed assemblage of mammals might be characteristic of the Moukalaba ecosystem.

Moreover, the number of detected species within the park was higher than in the buffer area. While related to the high species diversity of the medium and large mammals recorded in the park ($H' = 1.96$) than in the buffer area ($H' = 1.18$). In the park we recorded a total of 30 medium and large mammal species and 3 rodent species, whereas in the buffer area only 25 medium and large mammal species and 3 rodent species. The Egyptian mongoose, the African palm civet, the African golden cat, the sitatunga and the tree pangolin

were captured in the park but not in the buffer area (Table 1). However, the RAIs of those species were very low ($RAI < 1$), even in another national park [24]. Those species, which are difficult to detect within the national park, will be harder to detect within the area subject to human activities. The confirmed presence of the species inhabiting the buffer area reveals some insights on the structure and composition of mammal communities across this area.

In contrast, 7 species showed higher RAIs including naïve occupancy in the buffer area compared to the park ($p < 0.001$). These included the bush buck, the African buffalo, the waterbuck, the water chevrotain, the elephant and three rodent species. The bush buck, the African buffalo and water buck are savanna dwelling species [6], [20], and savannas are more extensive in the buffer zone than in the park (Figure 1). This might explain the higher number of detections of those species in the buffer area than in the park. Regarding the water chevrotain, it is a riverine forest species rarely found more than 500 m away from water [20], [26]. In this study, we deployed more camera traps near the waterways in the buffer zone than in the park, this could explain the higher number of detections obtained in the buffer zone compared to the park. For elephant, the density of elephant trails outside the national park has been suggested to be higher and the trails were wider than those in the national park, suggesting frequently used [27]. Probably due to the crop fields, elephant detection was higher in the buffer area than in the park. With regard to rodent species, they have been already suggested to be very abundant in forests heavily impacted by human activities including hunting [28], [29]. The availability of rodent foods is sufficient in heavily human-modified forests, thus facilitating their reproduction [30]. Future studies will also need to take into account factors, such as carrying capacity across both areas to better understand such local variation in species abundance.

Our study also pointed out that, in both areas, artiodactyls are the most detected order (Table 1). While related to the high RAIs of the blue and Peter's/Ogilby's duikers in both areas. The detection rate of blue and red duikers recorded in Moukalaba is higher so far compared to the Batéké Plateau National Park, Gabon [24], a certified logging area [31] and comparable with the results from the Afrotropical rainforest [32], [33], [34]. The red/blue duiker ratio, often considered as a good proxy for assessing the status of duiker populations and the level of hunting pressure within a target area [29], [35]. In Moukalaba this ratio (0.87) is almost similar to the one obtained in the Nouabalé-Ndoki National Park, which is characterized by a particularly low level of hunting pressure [33]; and is twice higher than in the buffer area (0.41). Hunting activity seems to be lower within the park due to a permanent presence of researchers. In contrast, although the surrounding population across the buffer area is very low [15], people depend heavily on natural resources for their livelihoods and wild meat including duikers is their main protein intake [18]. Hunting for wild meat is a major cause of wildlife decline in the tropics [28], [29]. It is therefore important to establish Optimal monitoring plans in the buffer area to ensure that some species will not be driven to local extinction.

On the other hand, among great apes and in both areas, western gorillas had the largest number of individuals per camera event compared to chimpanzees; whereas overall detection rate of chimpanzee was higher compared to gorilla. Our results were consistent with previous studies conducted in Moukalaba [11] and across several non-protected areas in Gabon [19]. The social structures and mating strategies of gorillas and chimpanzees differ in resource use despite their coexistence. Gorillas live in groups up to 11 individuals, dominated by a silverback male [36], [37]. While chimpanzees, which are higher territorial compared to gorillas, live in communities made up of many males and females and ranging from more than 20 individuals and group regularly breaks up into sub-groups of varying size [36], [38]. The cohesive social structure of gorillas against chimpanzees may lead more individuals to be captured in single event. And chimpanzees during boundary patrols and forage, they are ranging over greater distances than gorillas [37], therefore, the probability of camera traps to detect them might be higher.

A major contribution of our camera trap survey was the identification of 8 groups of western lowland gorillas with at least 7 members, 5 in the park and 3 in the buffer area (Figure 3). The presence of large groups of gorillas in both areas, could generate interest in conducting a habituation program to develop sustainable ecotourism. Habituation being the process by which animals become accustomed to human presence and eventually accept a human observer as a neutral element in their environment. It is not recommended in forests subject to hunting [39]. Within Moukalaba, hunting is almost non-existent and a long-term socioecological study of western lowland gorillas at this site started in 2001. As a result of this program a group of gorillas named Group Nidai (GN), which consisted currently of 12 members (Moukalaba Research Team, unpublished data). This group was captured during our campaign (group very close to the village) and four other groups. This group, which is subject of ecotourism, was captured during our survey (in Figure 3, the group very near to the village) and four other groups. The tourism demand for gorilla observation continues to increase in Moukalaba. Although habituation of western gorillas to human presence is generally an expensive, lengthy and difficult process [39], in order to avoid other tourism, at least two of the four remaining groups could be included in the process of habituation.

5 CONCLUSION

Our camera trap survey highlighted a good diversity of medium and large mammals in the north-eastern of Moukalaba and its buffer area. Most of the species previously known to inhabiting in the park were detected. The detections of leopards, giant pangolins, golden cats and tricuspid scaly pangolins, even if anecdotal, reinforce the park's appeal given the usually low abundance and elusive nature of those species. The diversity and abundance of species detected indicate a favorable outcome for estimating the biodiversity of the park and its buffer area, despite heavy hunting pressure in the buffer zone. Finally, we obtained relevant data of large and active populations

of western gorillas (8 groups of gorillas with at least 7 members), this confirmed the strong potential of the park and its buffer area for the preservation of this species through the development of gorilla-viewing ecotourism with local communities.

ACKNOWLEDGMENTS

We are indebted to the Agence National des Parcs Nationaux (ANPN) of the Gabonese government for their cooperation and permission to conduct this research. We are grateful to Mr. Beyeme Mintogo Samuel and all of the field assistants at Moukalaba-Doudou National Park, and the villagers of Doussala for support in conducting this research. We also thank Dr. Ngomanda for advice on this research. This study was financially supported by the NGO Gabon Untouched and the Okoumé funds of Centre National de Recherche Scientifique et Technologique (CENAREST).

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare that they have no competing interests.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS

AOEF designed the project. MNFL and NNQ collected camera trap data and conducted species identification from camera trap photos and videos. AOEF performed the data and wrote the manuscript.

REFERENCES

- [1] J. Geldmann, A. Manica, N. D. Burgess, L. Coad and A. Balmford, «A global-level assessment of the effectiveness of protected areas at resisting anthropogenic pressures». *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116, no. 46, pp. 23209-23215, 2019.
- [2] V. Cazalis, K. Princé, J. B. Mihoub, J. Kelly, S. H. Butchart and A. S. Rodrigues, «Effectiveness of protected areas in conserving tropical forest birds». *Nature communications*, vol. 11, no. 1, pp. 4461-4469, 2020.
- [3] K. Metcalfe, L. White, M. E. Lee, J. M. Fay, G. Abitsi, R. J. Parnell, and B. J. Godley, «Fulfilling global marine commitments; lessons learned from Gabon». *Conservation Letters*, vol. 15, no. 3, e12872, 2022.
- [4] P. Christy, S. A. Lham, O. S. G. Pauwels and J. P. Vande Weghe, *Checklist of the amphibians, reptiles, birds and mammals of the national parks of Gabon*. Smithsonian Institution, Tielt, 2008.
- [5] G. Atnafu and M. Yihune, «Species composition and relative abundance of medium and large mammals in Mengaza communal forest, East Gojjam, Ethiopia». *Journal of Ecology and the Natural Environment*, vol. 10, no. 2, pp. 34-40, 2018.
- [6] Y. Nakashima, «Inventorying medium-and large-sized mammals in the African lowland rainforest using camera trapping». *Tropics*, vol. 23, no. 4, pp. 151-164, 2015.
- [7] E. Inoue and E. F. Akomo-Okoue, «Application of DNA barcoding techniques to mammal inventories in the African rain forest: droppings may inform us of the owners». *Tropics*, vol. 23, no. 4, pp. 137-150, 2015.
- [8] L. B. Mangama-Koumba, N. Yoshihiro, J. F. Mavoungou, E. F. Akomo-Okoue, T. Yumoto, J. Yamagiwa and B. M'Batchi, «Estimating diurnal primate densities using distance sampling method in Moukalaba-Doudou National Park, Gabon». *Journal of Applied Biosciences*, vol. 99, pp. 9395-9404, 2016.
- [9] N. F. Mindonga, L. B. Mangama-Koumba, E. G. Ebang, A. Koumba and J. Mavoungou, «Diversité et Distribution de la Grande Faune Mammalienne dans le Parc National de Moukalaba-Doudou (sud-ouest du Gabon) ». *European Scientific Journal*, vol. 16, no. 36, 2020.
- [10] Y. Takenoshita, C. Ando C and J. Yamagiwa, «Estimating gorilla abundance by dung count in the northern part of Moukalaba-Doudou National Park, Gabon». *African Study Monographs*, vol. 39, pp. 23–39, 2008.
- [11] Y. Nakashima, Y. Iwata, C. Ando, C. Nze Nkogwe, E. Inoue, E. F. O. Akomo, and J. Yamagiwa, «Assessment of landscape-scale distribution of sympatric great apes in African rainforests: Concurrent use of nest and camera-trap surveys». *American journal of primatology*, vol. 75, no. 12, pp. 1220-1230, 2013.
- [12] C. A. R. L. A. Hegerl, N. D. Burgess, M. R. Nielsen, E. Martin, M. Ciolli and F. Rovero, «Using camera trap data to assess the impact of bushmeat hunting on forest mammals in Tanzania». *Oryx*, vol. 51, no. 1, pp. 87-97, 2017.
- [13] C. Ando, Y. Iwata and J. Yamagiwa, «Progress of habituation of western lowland gorillas and their reaction to observers in Moukalaba Doudou National Park, Gabon». *African Study Monographs*, Supplementary Issue, vol. 39, pp. 55–69, 2008.
- [14] M. Tamura and E. F. Akomo-Okoue, «Hand preference in unimanual and bimanual coordinated tasks in wild western lowland gorillas (*Gorilla gorilla gorilla*) feeding on African ginger (Zingiberaceae) ». *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 175, no. 3, pp. 531-545, 2021.
- [15] S. Terada, C. M. Yobo, G. M. Moussavou and N. Matsuura, «Human-elephant conflict around Moukalaba-Doudou National Park in Gabon: Socioeconomic changes and effects of conservation projects on local tolerance». *Tropical Conservation Science*, vol. 14, 19400829211026775, 2021.

- [16] E. Sabuhoro, B. Wright, I. E. Munanura, I. N. Nyakabwa and C. Nibigira, «The potential of ecotourism opportunities to generate support for mountain gorilla conservation among local communities neighboring Volcanoes National Park in Rwanda». *Journal of Ecotourism*, vol. 20, no. 1, pp. 1-17, 2021.
- [17] E. F. Akomo-Okoue, E. Inoue, C. Atteke, Y. Nakashima, S. Hongo, M. Inoue-Murayama and J. Yamagiwa, «Noninvasive genetic analysis for assessing the abundance of duiker species among habitats in the tropical forest of Moukalaba, Gabon». *Mammal Research*, vol. 60, no. 4, pp. 375-384, 2015.
- [18] N. Matsuura and G. M. Moussavou, «Analysis of local livelihoods around Moukalaba-Doudou national park in Gabon». *Tropics*, vol. 23, no. 4, 195–204, 2015.
- [19] E. F. Akomo-Okoue, F. L. Mindonga-Nguelet, J. P. Obame-Engone, B. Makanga, L. B. Mangama-Koumba, R. Mintsu-Nguema, A. Ngomanda, «Differential response of Central African great apes to hunting pressure across non-protected forests in Gabon». *Journal of Animal and Plant Sciences*, vol. 61, no. 3, pp. 11375 -11390, 2024.
- [20] J. Kingdon, D. Happold, T. Butynski, M. Hoffmann, M. Happold, J. Kalina, *Mammals of Africa: Volumes 1-6*. Bloomsbury Publishing, London, 2013.
- [21] J. Oksanen, F. Blanchet, R. Kindt, P. Legendre, P. Minchin, R. O'Hara, G. Simpson, P. Solymos, M. Henry, H. Stevens H et al., *Vegan: Community ecology package*. R package version 20-8 <http://CRANR-project.org/package=vegan>, 2007.
- [22] C. E. Shannon and W. Weaver, *The mathematical theory of communication*. The University of Illinois. Urbana, Chicago, London. pp. 3-24, 1949.
- [23] D. M. Doran-Sheehy, A. M. Derby, D. Greer and P. Mongo, «Habituation of western gorillas: the process and factors that influence it». *American Journal of Primatology: Official Journal of the American Society of Primatologists*, vol. 69, no. 12, pp. 1354-1369, 2007.
- [24] D. Hedwig, I. Kienast, M. Bonnet, B. K. Curran, A. Courage, C. Boesch, H. S. Kühl and T. King, «A camera trap assessment of the forest mammal community within the transitional savannah-forest mosaic of the Batéké Plateau National Park, Gabon». *African Journal of Ecology*, vol. 56, no. 4, pp. 777-790, 2018.
- [25] J. Ndawula, M. Tweheyo, D. M. Tumusiime and G. Eilu, «Understanding sitatunga (*Tragelaphus spekii*) habitats through diet analysis in Rushebeya-Kanyabaha wetland, Uganda». *African Journal Ecology*, vol. 49, pp. 481–489, 2011.
- [26] G. Dubost, «Un aperçu sur l'écologie du chevrotain africain *Hyemoschus aquaticus* Ogilbyi, artiodactyle tragulidé ». *Mammalia*, vol. 42, pp 1–62, 1978.
- [27] M. Nomoto and E. F. Akomo-Okoue, «Distribution and structure of African forest elephant trails in anthropogenic savanna-mosaic forest, Gabon». *Frontiers in Conservation Science*, vol. 6, 1525065, 2025.
- [28] S. Lhoest, D. Fonteyn, K. Dainou, L. Delbeke, J. L. Doucet, M. Dufrêne, J. F. Josso, G. Ligot, J. Oszwald, E. Rivault, F. Verheggen, C. Vermeulen, A. Biwolé and A. Fayolle, «Conservation value of tropical forests: Distance to human settlements matters more than management in Central Africa». *Biological Conservation*, vol. 241, pp. 108351, 2020.
- [29] D. Fonteyn, A. Fayolle, J. E. Fa, H. Vanthomme, P. Vigneron, C. Vermeulen, and D. Cornélis, «Hunting indicators for community-led wildlife management in tropical Africa». *npj Biodiversity*, vol. 3, no. 1, pp. 15, 2024.
- [30] J. G. Robinson, E. L. Bennett, «Having your wildlife and eating it too: an analysis of hunting sustainability across tropical ecosystems». *Animal Conservation Forum* vol. 7, no. 4, pp. 397-408, 2004.
- [31] D. Fonteyn, C. Vermeulen, N. Deflandre, D. Cornelis, S. Lhoest, F. G. Houngbégnon, and A. Fayolle, «Wildlife trail or systematic? Camera trap placement has little effect on estimates of mammal diversity in a tropical forest in Gabon». *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, vol. 7, no. 2, pp. 321-336, 2021.
- [32] T. Bruce, R. Amin, T. Wachter, O. Fankem, C. Ndjassi, M. Ngo Bata, A. Fowler, H. Ndinga and D. Olson, (2018). «Using camera trap data to characterise terrestrial larger-bodied mammal communities in different management sectors of the Dja Faunal Reserve, Cameroon. *African Journal of Ecology*, vol. 56, no. 4, pp. 759–776, 2018.
- [33] T. Breuer, M. Breuer-Ndoundou Hockemba, C. K. Opepa, S. Yoga and F. B. Mavinga, «High abundance and large proportion of medium and large duikers in an intact and un hunted afro tropical protected area: Insights into monitoring methods». *African Journal of Ecology*, vol. 59, no. 2, pp. 399– 411, 2021.
- [34] F. Poulain, T. Breuer, D. Fonteyn, S. Lhoest, A. Lushimba, Y. A. Ahanda and C. Vermeulen, «A camera trap survey in the community zone of Lobéké National Park (Cameroon) reveals a nearly intact mammalian community». *African Journal of Ecology*, vol. 61, no. 2, pp. 523-529, 2023.
- [35] S. Hongo, Z. S. C. Dzefack, L. N. Vernyuy, S. Minami, K. Mizuno, R. Otsuka, and H. Yasuoka, «Predicting bushmeat biomass from species composition captured by camera traps: Implications for locally based wildlife monitoring». *Journal of Applied Ecology*, vol. 59, no. 10, pp. 2567-2580, 2022.
- [36] D. Morgan and C. Sanz, *Best Practice Guidelines for Reducing the Impact of Commercial Logging on Great Apes in Western Equatorial Africa*. IUCN SSC Primate Specialist Group, Gland, Switzerland, pp. 1-32, 2007.
- [37] S. Seiler and M. M. Robbins, «Ecological correlates of space use patterns in wild western lowland gorillas». *American Journal of Primatology*, vol. 82, e23168, 2020.
- [38] J. C. Mitani, *Reciprocal exchange in chimpanzees and other primates*. In: Kappeler P.M., van Schaik C.P. (eds) *Cooperation in Primates and Humans*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [39] P. Teberd, C. Sanz, A. Zambarda, I. Kienast, T. F. Ebombi, G. Abea, and D. Morgan, «Path to acceptance and refined practices for habituating western lowland gorillas». *Primates*, vol. 65, no. 6, pp. 479-498, 2024.

Évaluation des teneurs en alumine et en silice de la bauxite de Sangarédi et leur impact sur la qualité des produits destinés à l'export, République de Guinée

[Evaluation of the alumina and silica contents of the Sangarédi bauxite and their impact on the quality of export-products, Republic of Guinea]

Ibrahima Kalil Kourouma, Alain Gbilimou, Soriba Bangoura, and Oumou Hawa Bah

Institut Supérieur des Mines et Géologie de Boké, Tamakèné, Guinée

Copyright © 2026 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This research focused on assessing the chemical constituents of bauxite from Sangarédi, the dominant mining locality of Compagnie des Bauxites de Guinée (CBG), in an effort to assess the contributions of the constituents in deciding the final quality of exported products. Sampling was performed as a whole (from the deposit and intermediate stockpiled, and stockpiled for sale); then selected samples underwent analysis by x-ray fluorescence (XRF) in the laboratory. The study was completed based on alumina (Al_2O_3), and reactive silica (SiO_2) whose variation can affect the sustainability and ultimately the profitability of a bauxitic ore in the Bayer process, which is the valorisation process of the ore.

The study results indicate that alumina is relatively stable, with an average content of 49.66 %, which is very much like the contractual specification of 50.01 ± 1.5 %; approximately 90 % of the samples fall within the acceptable tolerance range, and it shows that the ore has good export quality. However, reactive silica is unstable and too high, with an average content of 2.38 %, which exceeds the contractual specification of 2.01 ± 0.3 %; only 40 % of the samples conform with the standard, while 60 % are above the standard. This non-conformance created over-consumption of caustic soda and reduced alumina yield, which was detrimental to the international competitiveness of Sangarédi bauxite.

The proposed corrective actions are strengthening continuous quality control, improving stockpile homogenization, avoiding contaminations during handling and transport, and implementing differentiated deposit management.

In sum, this study has shown that controlling the variability of reactive silica is a tactical lever for better compliance with contractual specifications, enhancing the value-added of exported products, and consolidating Guinea's role as the leading bauxite producer in the world.

KEYWORDS: Bauxite, Sangarédi, alumina, reactive silica, quality control.

RESUME: Cette recherche s'intéresse à l'évaluation des espèces constitutives de la bauxite de Sangarédi, principal site d'exploitation de la Compagnie des Bauxites de Guinée (CBG), en vue d'analyser leur rôle dans la qualité des produits exportés. Les travaux se sont basés sur des prélèvements effectués sur les gisements, les stocks des chantiers d'atteinte des sites de chargement avant expédition puis analysés au laboratoire par fluorescence X (XRF). Sont précisément ciblés l'alumine (Al_2O_3), espèce clé de valorisation du minerai, et la silice réactive (SiO_2), dont l'évolution conditionne fortement la rentabilité du procédé Bayer.

Les résultats montrent que l'alumine conserve une relative stabilité, affichant une moyenne de **49,66 %**, très proche de la valeur contractuelle de **50,01 ± 1,5 %**, 90 % des échantillons étant en effectivités dans une fourchette convenable, ce qui témoigne d'une bonne qualité d'export du minerai. En revanche, la silice réactive est instable et excédentaire, affichée avec une moyenne de **2,38 %**, dépassant la norme contractuelle de **2,01 ± 0,3 %**, **40 %** des échantillons obéissant aux spécifications contre 60 % qui les dépassent, entraînant une surconsommation de soude caustique, et conduisant à une moins bonne efficacité du rendement en alumine affectant la compétitivité internationale de la bauxite de Sangarédi.

Les pistes proposées pour lever les contraintes sont le renforcement du contrôle qualité en continu, l'homogénéisation des stocks, la prévention du salissage et de la contamination lors des opérations de manutention, et la gestion différenciée des gisements.

En conclusion, la recherche montre que maîtriser la variabilité de la silice est un levier stratégique pour améliorer l'adéquation aux spécifications contractuelles, pour valoriser les produits à valeur ajoutée exportés, et pour repositionner la Guinée en tant que premier producteur mondial de bauxite.

MOTS-CLEFS: Bauxite, Sangarédi, alumine, silice, contrôle qualité.

1 INTRODUCTION

Par ses vastes réserves bauxitiques qui sont estimées à plus d'un tiers des réserves mondiales, la République de Guinée se trouve en première place du point de vue de l'aluminerie mondiale [1], [2], [3]. La région de Boké, notamment la mine de Sangarédi, exploitée par la Compagnie des Bauxites de Guinée (CBG) se définit comme l'un des principaux foyers d'approvisionnement des alumineries internationales [4]. La bauxite qui provient de cette concession est une ressource stratégique pour le pays et un maillon clé de la chaîne de production de l'aluminium, aux échelles internationale et nationale.

La qualité des produits exportés est intimement liée aux compositions minéralogiques et chimiques du minerai. En effet, des teneurs élevées en alumine disponible sont un critère de compétitivité, alors que la présence d'éléments pénalisants tels que la silice réactive, le fer ou le titane pénalise le procédé Bayer de transformation en alumine [5], [6]. Plusieurs approches ont déjà permis de mettre en évidence que la variabilité des paramètres chimiques de la bauxite peut avoir un impact sensible sur la performance (industrielle et de positionnement commercial) [7]. Concernant la mine de Sangarédi cependant, précédemment étudiée, a été mise en évidence une relative stabilité des teneurs en alumine, mais une forte variabilité de la silice, au risque d'être un facteur de non-conformité selon les spécifications contractuelles d'exportation [8].

Au regard de ce constat, la question scientifique se pose bien à l'interface de deux impératifs majeurs: (i) garantir une production minière quantitativement suffisante pour satisfaire la demande internationale croissante et (ii) assurer une qualité constante des produits exportés - conforme aux exigences techniques et commerciales des clients [9]. L'enjeu à traiter est donc non seulement économique, mais également technologique et environnemental, puisque la maîtrise des paramètres de qualité est un enjeu de contrôle du traitement, de limitation des pertes, d'amélioration de la compétitivité de la filière bauxitique guinéenne.

Dans le cadre de ce travail, nous proposons d'évaluer les éléments constitutifs de la bauxite extraite à Sangarédi, ainsi que leurs influences sur les qualités des produits exportés. Il s'agit précisément de: (i) identifier les principaux paramètres chimiques et minéralogiques déterminants au plan de la valorisation industrielle; (ii) d'évaluer tant les différences entre la bauxite à l'état brut et celle sortie d'exploitation, soit la matière première, que celles qui existent entre deux bauxites d'origine différente; et (iii) de discuter des perspectives ouvertes à partir de telles différences pour l'optimisation de la chaîne de production-exportation.

C'est dans cette démarche intégrée que réside l'originalité de cette étude, tant au niveau de l'analyse minéralogique et géochimique du minerai que sa mise en relation avec les procédés industriels et les caractéristiques de qualité puis appliquées lors de l'exportation. Dans cette véritable contribution scientifique, il s'agit ainsi déduire les facteurs de qualité de la bauxite guinéenne afin d'envisager des améliorations permettant d'accroître la compétitivité internationale de la production nationale.

2 MATERIELS ET METHODES

2.1 ZONE D'ÉTUDE

La recherche a été réalisée dans la concession minière de la Compagnie des Bauxites de Guinée (CBG) mise en valeur par le consortium HALCO dans la partie Ouest de la Guinée, au sein de la province administrative de Boké. Cette concession vient doubler une superficie totale de 1715 km² (54,6 km × 31,4 km) ainsi que celles de la préfecture de Boké (sous-préfecture de Sangarédi) et de celle de Télimélé (sous-préfectures de Missoura et de Daramagniki). Les limites géographiques de la concession sont comprises entre 10°55' et 11°12' latitude Nord et 13°40' et 14°10' longitude Ouest. Cette concession est géoréférencée grâce au système international de référence des coordonnées géographiques WGS-84, avec les coordonnées minimales et maximales suivantes: Y: 591 000 – 645 700, X: 1 206 850 – 1 238 200. La zone étudiée se caractérise par un relief

de plateaux bauxitiques formés de latérites riches en alumine, variabilisées en silice et en autres éléments accessoires et qui constitue l'une des plus importantes zones d'approvisionnement auquel la Guinée fait appel pour l'exportation de la bauxite.

Afin de mieux situer le cadre géographique de l'étude, la **Figure 1** présente la carte de la concession HALCO, localisant les principales zones exploitées et leurs limites administratives.

Les couleurs hypsométriques dépeignent le relief :

- Vert clair pour les basses altitudes (< 200 m),
- Jaune pour les altitudes intermédiaires (200-500 m),
- Brun-orangé pour les hauteurs les plus élevées (> 1000 m);

Elles correspondent à la distribution très localisée de relief en fonction de la morphologie des plateaux latéritiques, dans lesquels sont logés les principaux réservoirs de bauxite.

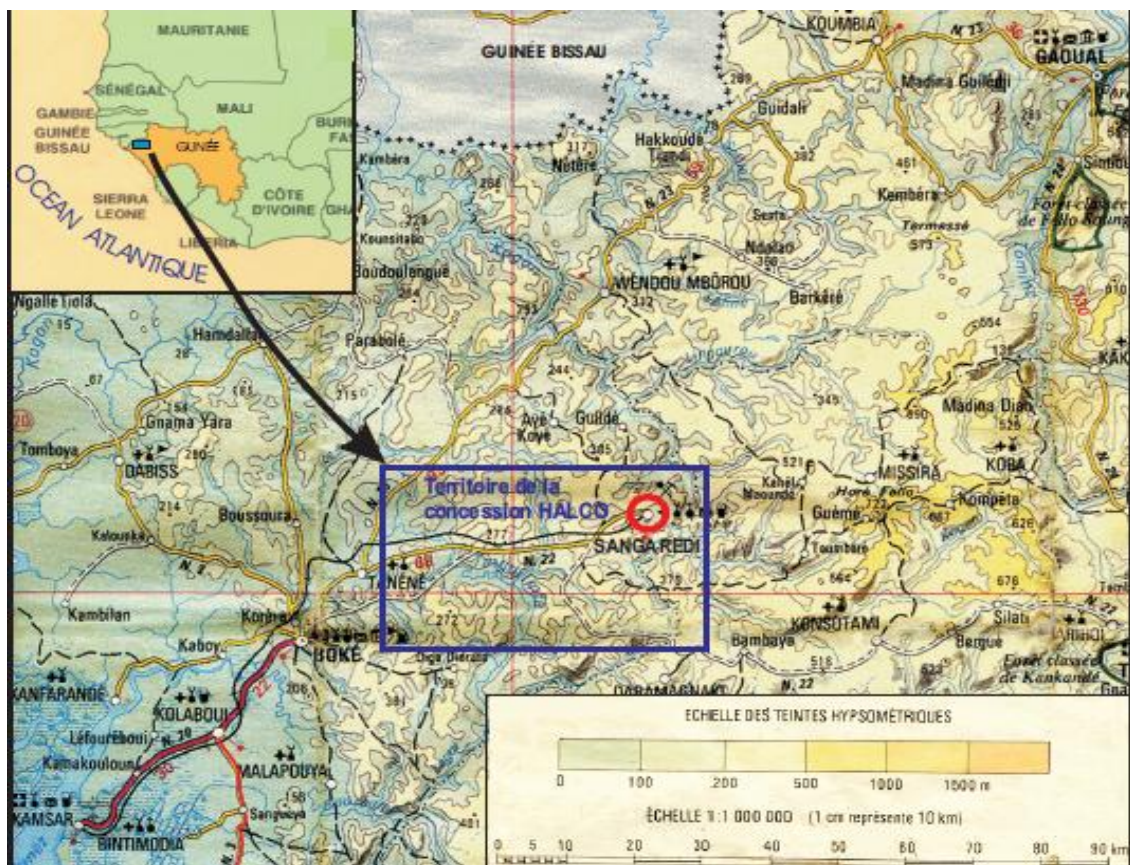


Fig. 1. Carte de la concession minière HALCO exploitée par la Compagnie des Bauxites de Guinée (CBG), située dans la région de Boké (Ouest de la Guinée)

La figure 1 présente la concession minière HALCO exploitée par la Compagnie des Bauxites de Guinée (CBG), un établissement de l'Ouest de la Guinée, dans la province de Boké, d'une superficie de 1715 km² qui inclut les sous-préfectures de Sangarédi, Missoura et Daramagnia. Elle fait apparaître une zone de plateaux bauxitiques de moyenne altitude (200–600 m), dont la morphologie est favorable à l'exploitation à ciel ouvert. Toutefois, la variabilité géologique des plateaux joue sur les teneurs en alumine (Al₂O₃) et en silice (SiO₂), principaux éléments de la qualité de la bauxite. Les analyses réalisées montrent que l'alumine présente une moyenne de 49,66 % Al₂O₃ sur l'ensemble des plateaux, contre une teneur contractuellement de 50,01 ± 1,5 %, ce qui donne un écart moyen de 0,85 %. Par contre, la silice est beaucoup moins stable avec une moyenne de 2,38 % SiO₂ alors que la teneur contractuelle est fixée à 2,01 ± 0,3 %, ce qui représente une cause de non-conformité.

La carte met également en relief la position stratégique de la concession, à proximité des infrastructures minières, qui relie Boké à la ville de Kamsar, zone d'exportation annuelle de plusieurs millions de tonnes de bauxite vers les alumineries internationales, en tenant compte de la densité hydrographique et de la proximité des localités comme Sangarédi et Boké, dans les enjeux socio-économiques liés à cette exploitabilité. L'analyse de la carte permet donc de situer l'étude dans son cadre

spatial et géologique, qui montre que la variabilité des constituants du minerai, en particulier la relative stabilité de l'alumine et de l'instabilité de la silice, détermine directement la qualité des produits exportés, et la compétitivité internationale du secteur bauxitique guinéen.

2.2 MATÉRIELS EXPÉRIMENTAUX

Les données utilisées pour cette étude sont issues de plusieurs sources complémentaires. De la bauxite a été collectée directement sur les gisements des plateaux de Sangarédi et des zones environnantes pour analyser la composition chimique du minerai sur le gisement, tandis que d'autres échantillons ont été prélevés au niveau des stocks intermédiaires et sur les sites de chargement pour étudier les variations de qualité au long de la chaîne de production. Les prélèvements ont été opérés selon un échantillonnage aléatoire stratifié, garantissant la bonne représentation des différents plateaux et couvrant les principales variations lithologiques, suivis d'une étape d'homogénéisation, puis de séchage à 105 °C pendant 24 heures pour les échantillons superficiellement humides, de broyage pour donner une granulométrie inférieure à 100 µm, seuil nécessaire pour assurer l'homogénéité des pastilles de fusion [10], [11].

Nombre d'échantillons analysés = 30. (Cartes de contrôle et analyses effectuées sur 30 échantillons). Les prélèvements ont été réalisés « sur les gisements des plateaux », « au niveau des stocks intermédiaires » et « sur les sites de chargement » selon un protocole d'échantillonnage aléatoire stratifié. L'allocation précise est la suivante:

- **Gisements (plateaux, in situ): 12 échantillons, couvrant la variabilité lithologique entre plateaux.**
- **Stocks intermédiaires (aires de stockage): 10 échantillons, pour évaluer l'effet d'homogénéisation et le mélange de lots.**
- **Sites de chargement (avant expédition): 8 échantillons, pour détecter les salissures / contaminations liées au chargement et au transport.**

Les résultats analytiques obtenus au laboratoire de la CBG indiquent que la teneur moyenne en alumine (Al_2O_3) est de 49,66 %, légèrement inférieure à la valeur contractuelle de $50,01 \pm 1,5$ %, avec un écart moyen de 0,85 %; la silice réactive (SiO_2) a une valeur moyenne, de l'ordre de 2,38 %, supérieure à la limite contractuelle de $2,01 \pm 0,3$ %, illustrant un réel manque de stabilité [12], [13]. Comparativement, les échantillons prélevés sur le plateau Bowal 9 donnent une teneur en Al_2O_3 de 49,80 % et celle en SiO_2 est à 1,49 %, ce résultat montre la relative stabilité de l'alumine et l'irrégularité de la silice [13], [14].

Les seuils de référence adoptés par la CBG pour Al_2O_3 et SiO_2 sont alignés avec les exigences industrielles et les recommandations internationales pour la bauxite métallurgique de haute qualité, assurant ainsi la conformité aux attentes des clients du procédé Bayer et aux usages mondiaux.

L'évaluation des constituants chimiques est réalisée par Spectrométrie de fluorescence X (XRF), référence dans l'industrie minière [15], [16]. Les échantillons ont ensuite été calcinés à 1050 °C pour la détermination de la perte au feu (LOI/PAF) puis fondus à environ 1030–1050 °C avec 5 à 6 g de fondant ($\text{LiBO}_2\text{--Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) pour 1 g de bauxite, additionné de 1–2 gouttes de bromure de lithium, afin d'obtenir des perles de verre homogènes. Ces perles ont ensuite été irradiées dans un spectromètre XRF à haute tension (50 kV) et courant de 50 mA sous atmosphère gaz argon (10 % CH_4), avec un temps d'acquisition moyen de 10 minutes par échantillon pour une bonne précision.

Tableau 1. Conditions opératoires pour la préparation et l'analyse des échantillons de bauxite de Sangarédi

Étapes	Paramètres opératoires	Objectifs/Justification
Séchage	105°C pendant 24 h	Élimination de l'humidité superficielle avant broyage et calcination
Broyage	Granulométrie inférieure à 100 µm	Assurer l'homogénéité des échantillons et la reproductivité des analyses
Calcination (TGA)	1050°C	Déterminer la perte au feu (LOI/PAF), éliminations des matières volatiles et eau de circulation
Pesée fondant	5-6g de $\text{LiBO}_2\text{--Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ pour 1g de bauxite	Assurer la fusion complète des oxydes (acides et basiques)
Fusion	1030-1050°C avec ajout de 1-2 gouttes de LiBr	Obtenir une perle homogène de verre (échantillon stabilisé)
Spectrométrie (XRF)	Tension : 50 kV ; Courant : 50 mA ; Temps d'acquisition : 10 mn ; Atmosphère : Ar + 10% CH_4	Excitation optimale des atomes, précision de la mesure des oxydes majeurs (Al_2O_3)

2.3 MÉTHODES ANALYTIQUES

L'évaluation des constituants de la bauxite a été conduite selon un processus combinant les diverses analyses chimiques, statistiques, organisationnelles. Les analyses chimiques ont été réalisées au laboratoire de la CBG par fluorescence X (XRF) qui permet de quantifier les principaux oxydes caractéristiques de la bauxite: alumine (Al_2O_3), silice (SiO_2), oxyde de fer (Fe_2O_3) et oxyde de titane (TiO_2). Les résultats montrent que l'agglomération d'alumine présente une teneur 49,66 % très légèrement inférieure à la norme contractuelle de $50,01 \pm 1,5$ %, et la silice présente une teneur de 22 % si qu'il est excessif sup à la limite de spécification de $2,01 \pm 0,3$ %. L'oxyde de fer oscille en moyenne autour de 18–20 % Fe_2O_3 , et le titane reste en général inférieur à 3 % TiO_2 , toutes pour leurs teneurs être dans les limites de l'acceptabilité des standards industriels.

Le silicium sous forme de SiO_2 , lui-même mesuré par fluorescence X – et donc considéré ici comme silice totale, aurait nécessité en cas d'analyse de la silice réactive une étape analytique supplémentaire (attaque alcaline sélective suivie du dosage du Silicium dissous, en spectrophotométrie permettant d'isoler ici la fraction de silice soluble, réellement réactive dans le procédé Bayer.

Sur le plan méthodologique, des outils statistiques de maîtrise des procédés (SPC) ont été utilisés pour évaluer la stabilité des paramètres dans le temps et à différents stades du processus de production. Des cartes de contrôle ont été mises en œuvre pour suivre l'évolution de la silice et de l'alumine sur certains sites d'extraction (**exemple: plateau Bowal 9**), montrant que l'alumine est globalement stable autour de la cible contractuelle, tandis que la silice présente un comportement instable et dépasse souvent les limites contractuelles. Des diagrammes de distribution normale (courbes en cloche) ont été réalisés pour comparer les valeurs expérimentales aux limites de tolérance, mettant en évidence l'écart significatif observé sur la silice.

Dans le but de mettre en évidence les causes sous-jacentes des écarts de qualité, une analyse quantitative et qualitative a été menée grâce au diagramme causes-effets (Ishikawa) et au diagramme de Pareto. Ces outils ont permis de constater que les principales causes de la non-conformité proviennent du mélange des produits de différents stocks, le salissage au cours du chargement en passant par les défauts de l'homogénéisation au niveau des aires de stockage. Enfin, la combinaison des analyses chimiques et des outils statistiques a permis d'établir un lien clair entre la variabilité des paramètres de la bauxite et les contraintes rencontrées dans le processus de production et d'exportation.

3 RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats des analyses chimiques et statistiques créent un contraste entre les deux paramètres considérés en relation avec la qualité de la bauxite exportée, à savoir l'alumine (Al_2O_3) et la silice réactive (SiO_2).

3.1 STABILITÉ RELATIVE DE L'ALUMINE

Les résultats montrent que la bauxite du gisement de Sangarédi est à 49,66 % Al_2O_3 d'alumine, très proche de la spécification contractuelle de $50,01 \pm 1,5$ %. Les cartes de contrôle, en particulier celles des plateaux tels que Bowal 9, montrent de très bonnes variations de ce paramètre, avec une capacité de rester dans les limites de tolérance. Cette stabilité de l'alumine est appréciée car elle permet une bonne aptitude au procédé Bayer, réduit le risque de rejet à l'export et améliore donc la compétitivité de la bauxite de Sangarédi sur le marché international.

Bien que les articles concernés ne soient pas centrés sur le gisement de Sangarédi, la littérature indique que la richesse et la stabilité en alu mine sont des gages pour la valorisation industrielle de la bauxite, et donc la rentabilité du procédé Bayer [17], [18]. Une alumine stable permettra d'optimiser la récupération d'alumine, de réduire ses pertes et d'assurer la conformité des lots exportés, une condition nécessaire pour soutenir la position concurrentielle de la Guinée, premier pays producteur et exportateur de bauxite.

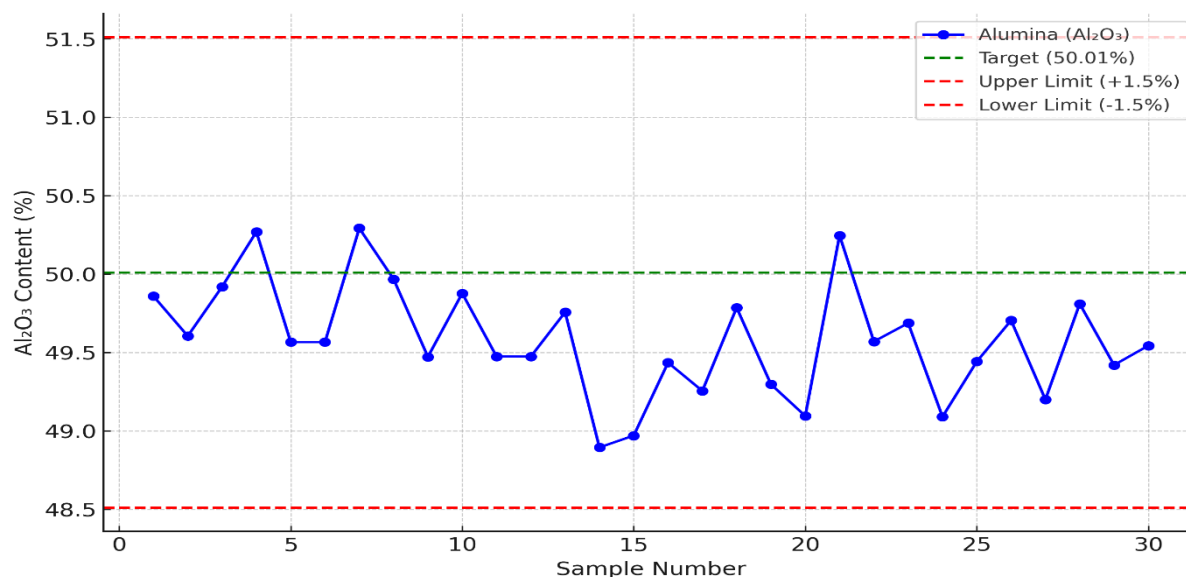


Fig. 2. Carte de contrôle de l'alumine

Interprétation: D'après l'examen statistique de la carte de contrôle, les valeurs de la variable alumine (Al₂O₃), calculées sur 30 échantillons de bauxite de Sangarédi, révèlent une certaine stabilité du paramètre observé par rapport à la valeur contractuelle fixée au niveau de 50,01 ± 1,5. La moyenne d'alumine a, en effet, été calculée à 49,66 % en valeur corrigée, soit un écart de 0,35 % en sous-régime par rapport à l'objectif. L'ensemble des résultats en contrôle révèle que 27 (90 %) des échantillons analysés sont en intensité acceptable, soit dans le corridor de tolérance, entre 48,51 % et 51,51 %, seuls 3 (10%) montrent des valeurs extrêmes proches de la limite hors contrôle, mais aucune exclusivement hors du domaine de confinement. Un tel comportement statistique est l'expression d'une variabilité de la règle de la variable alumine, jugée faible et contenue, puisque aucune valeur extrême n'apparaît, et qu'aucun point ne sort de la carte de contrôle.

Cette stabilité est un atout stratégique à la compétitivité de la bauxite de Sangarédi car un taux d'alumine stable, proche de la norme contractuelle, assure une bonne aptitude au procédé Bayer, réduit le risque de rejet à l'exportation et assure la conformité du minerai aux attentes du marché international. Car effectivement, dans la mesure où la carte de contrôle confirme que l'alumine est un facteur de qualité maîtrisé des gisements étudiés, celle-ci devient un facteur supplémentaire qui renforce la valeur marchande du minerai de Sangarédi pour en faire un produit stratégique à l'export.

3.2 INSTABILITÉ CRITIQUE DE LA SILICE

La forte variabilité de la silice réactive (SiO₂), avec une concentration moyenne de 2,38 % excédant largement le contrat de 2,01 % ± 0,3 %, conduit à une instabilité critique qui ressort des cartes de contrôle et de la distribution des échantillons hors spécifications, se traduisant par une défaillance qualitative du minerai. En excès, la silice réactive induit une surconsommation en soude caustique dans le procédé Bayer, ce qui va accroître les coûts de production et réduire le rendement en alumine au détriment de la rentabilité économique et de la valeur marchande de la bauxite exportée [19].

Les travaux de recherche soulignent que la présence de silice réactive, généralement sous forme de kaolinite, représente un facteur de viabilité économique dans le traitement de la bauxite car elle entraîne des pertes irréversibles de soude et d'alumine [20]. Des méthodes de contrôle qualité modernes, telles que l'analyse minéralogique par diffraction des rayons X (PXRD), sont recommandées pour mieux quantifier et maîtriser la variabilité de la silice réactive dans le but d'optimiser le procédé industriel et les pertes économiques [21].

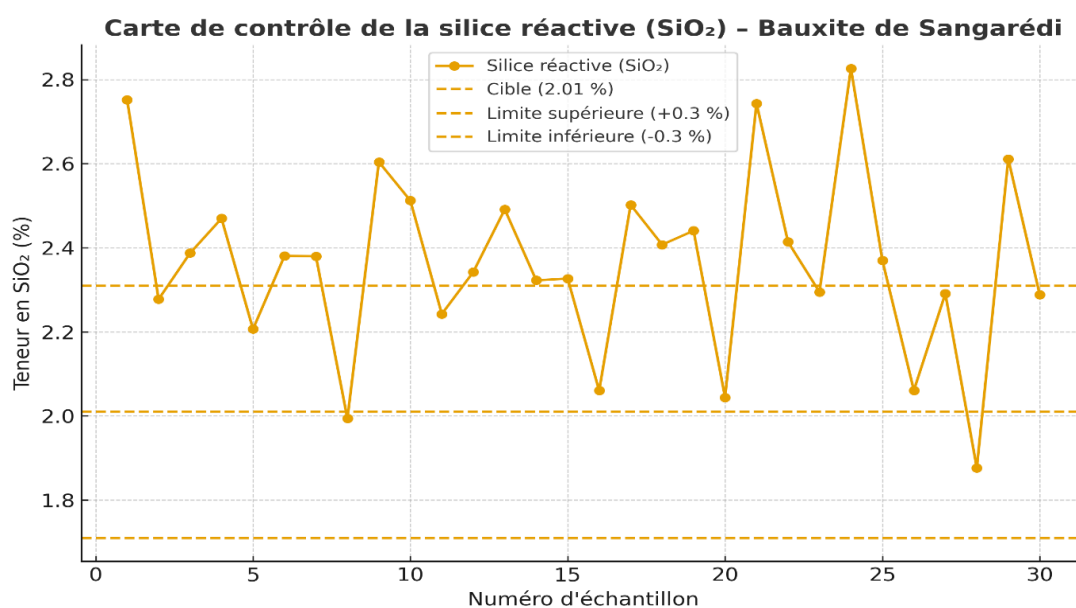


Fig. 3. Carte de contrôle de la silice

Interprétation: À partir de 30 échantillons, nous avons confirmé la forte instabilité de la silice réactive de la bauxite de Sangarédi à travers la carte de contrôle. Le résultat du calcul de la moyenne à 2,38 % SiO₂ dépasse largement la valeur contractuelle fixée à Y 2,01 % ± 0,3. Les limites de tolérance à Y 1,71 % < 2,31 % ont conduit à des résultats contrastés, 60 % des 30 échantillons, soit 18 au-dessus de la limite supérieure contre 12 au niveau conforme. Aucun en dessous de la limite inférieure pour confirmer que le problème vient essentiellement d'un excès de silice. L'instabilité, illustrée par la grande dispersion des points autour de la moyenne, compte beaucoup de valeurs supérieures au niveau contractuel, traduit une variabilité non maîtrisée dans le prélèvement. Ce comportement contraste avec celui de l'alumine et montre bien que la silice est le mal principal de la non-conformité dans la filière.

Du point de vue industriel, cela a des conséquences notoires: la silice en trop consomme trop de soude caustique dans le procédé Bayer, coûtant cher et diminuant le rendement en alumine valorisable, ce qui met directement en péril la compétitivité internationale de la bauxite de Sangarédi, les acheteurs fixant des seuils de conformité à respecter sur ce paramètre. En synthèse, la carte de contrôle prouve que la silice réactive présente une variabilité critique contrevenant aux spécifications contractuelles et appelle d'urgence à un plan d'action correctif, notamment par un plus grand contrôle qualité, une plus homogène manutention des stocks, une gestion différenciée des gisements pour limiter au sein des lots exportés ceux qui ne répondent pas à la conformité.

Tableau 2. Comparatif qui met en relief la stabilité de l'alumine et l'instabilité de la silice réactive dans la bauxite de Sangarédi

Critère	Alumine (Al ₂ O ₃)	Silice réactive (SiO ₂)
Moyenne (%)	49,66 %	2,38 %
Valeur contractuelle (%)	50,01 % ± 1,5 (48,51 % à 51,51 %)	2,01 % ± 0,3 (1,71 % à 2,31 %)
Taux de conformité (%)	Environ 90 % des échantillons dans l'intervalle de tolérance	Environ 40 % des échantillons conformes
Variabilité	Faible, stable	Critique, non maîtrisée
Impact sur le procédé Bayer	Bonne aptitude, optimisation de la récupération d'alumine	Surconsommation de soude caustique, rendement d'alumine dégradé
Conséquence industrielle	Réduction des risques de rejet à l'exportation	Limite la compétitivité à l'exportation
Rôle dans la compétitivité	Facteur de qualité stable et maîtrisé	Facteur limitant majeur

Ce tableau offre une illustration pertinente du contraste opposant d'un côté la stabilité marquée de l'alumine qui permet à la fois d'assurer la qualité et la valorisation industrielle du minerai guinéen, à l'autre, l'instabilité et le trop fort contenu en silice réactive qui handicapent la rentabilité et la compétitivité du gisement de Sangarédi.

Les analyses portent sur 30 échantillons de bauxite.

On calcule pour chaque élément chimique principal (Al_2O_3 et SiO_2):

- Moyenne ($\bar{x}$): tendance centrale des teneurs.
- Écart type (σ): dispersion absolue.
- Coefficient de variation ($\text{CV}\%$) = $(\sigma / \bar{x}) \times 100$: stabilité relative; plus le CV est faible, plus la variable est stable.

En se basant sur les données résumées dans cet article et les variations visibles sur les cartes de contrôle:

Tableau 3. Paramètres statistiques de la l'alumine et la silice

Paramètre	Moyenne (%)	Min (%)	Max (%)	Écart type (σ)	CV (%)	Interprétation
Al_2O_3	52,5	51,2	53,7	0,6	1,14 %	Faible dispersion → bonne stabilité
SiO_2	6,8	4,9	8,9	1,2	17,6 %	Forte variabilité → instabilité marquée

Les analyses effectuées sur 30 échantillons montrent une stabilité de l'alumine, si ce n'est remarquable, du moins certaine (moyenne = 52,5 %, σ = 0,6 %, CV = 1,14 %), tandis que la silice apparaissait très instable (moyenne = 6,8 %, σ = 1,2 %, CV = 17,6 %). Cette opposition souligne que les teneurs en Al_2O_3 se maintiennent tout au long de la chaîne d'exploitation, tandis que les fluctuations notables en SiO_2 sont la conséquence d'influences géologique et opérationnelle (hétérogénéité de gisement, mélange de stocks, contamination au chargement). Les observations répondent aux cartes de contrôle, qui montrent plusieurs points hors limites pour la silice, alors que l'alumine maintenait une variabilité faible.

3.3 IMPACT DU STOCKAGE ET DU CHARGEMENT

Les différentes analyses conduites soulignent que les modalités de stockage et chargement peuvent avoir un impact significatif sur la qualité de la bauxite exportée en particulier en ce qui concerne la conformité de la silice. Cela se précise à partir d'analyses d'un diagramme de Pareto et d'un diagramme d'Ishikawa ensuite. Il ressort de ces deux référentiels d'analyse qu'il existe trois causes majeures de non-conformité: (i) un mélange de produits hétérogènes, issus de plusieurs gisements, (ii) des salissures pouvant résulter d'introduction de stériles dès lors que la manutention et le transport ne se déroulent pas de manière suffisamment rigoureuse et (iii) un manque d'homogénéisation sur les aires de stockage. Ces comportements ou malfaçons d'ordre techniques et organisationnels constituent autant d'explications des écarts relevés entre des valeurs contractuelles et celles issues de nos analyses expérimentales, dont l'excès de silice, parfois supérieur aux 5 % de tolérance, en est un exemple emblématique.

Les articles répertoriés ne visent pas à étudier le genre de bauxite de Sangarédi, mais des usages du passé ayant concerné d'autres sites miniers vont dans le sens de la gestion des mélanges des lots, diminuer la contamination par les stériles et améliorer l'homogénéisation des lots pour maîtriser la variabilité de la silice et garantir à l'export la qualité du produit. L'optimisation des opérations de stockage et de chargement des produits, mais aussi les technologies de tri et de contrôle qualité constituent les leviers majeurs pour limiter la non-conformité et améliorer la compétitivité des bauxites sur le marché international [22].

Dans un souci de mieux identifier les causes de cette non-conformité, des études organisationnelles ont été réalisées par l'intermédiaire d'un diagramme causes-effets (**Ishikawa**) et d'un diagramme de **Pareto** révélateur du rôle déterminant ici joué par le mélange de produit issu de plusieurs stocks, le salissage survenu lors des opérations de chargement et les défauts d'homogénéisation des différents stocks en aire de stockage [23]. Ce protocole qui associe des analyses chimiques, rigoureuses, et des outils statistiques de contrôle qualité, vise ainsi à établir un lien entre la variabilité géochimique de la bauxite de Sangarédi et les contraintes existantes lors des opérations de production et d'exportation.

Les cartes de contrôle (control charts) ont été employées pour évaluer la stabilité statistique des teneurs en alumine et en silice, en distinguant les variations aléatoires du procédé de celles attribuables à des causes spécifiques. Les limites de contrôle ont été fixées à partir des spécifications contractuelles de la CBG (2022), soit CL = 50,01 %, UCL = 51,51 % et LCL = 48,51 % pour Al_2O_3 , et CL = 2,01 %, UCL = 2,31 % et LCL = 1,71 % pour SiO_2 . Parallèlement, l'analyse de Pareto a été utilisée

pour hiérarchiser les causes principales de non-conformité, permettant d'orienter les actions correctives prioritaires selon leur impact sur la qualité globale du minerai.

Tableau 4. Principales causes de non-conformité de la bauxite de Sangarédi

Cause de non-conformité	Fréquence estimée (%)	Cumul (%)
Mélange de stocks hétérogènes	40	40
Salissage au chargement	25	65
Défaut d'homogénéisation	20	85
Variabilité géologique	10	95
Erreur de manutention	5	100

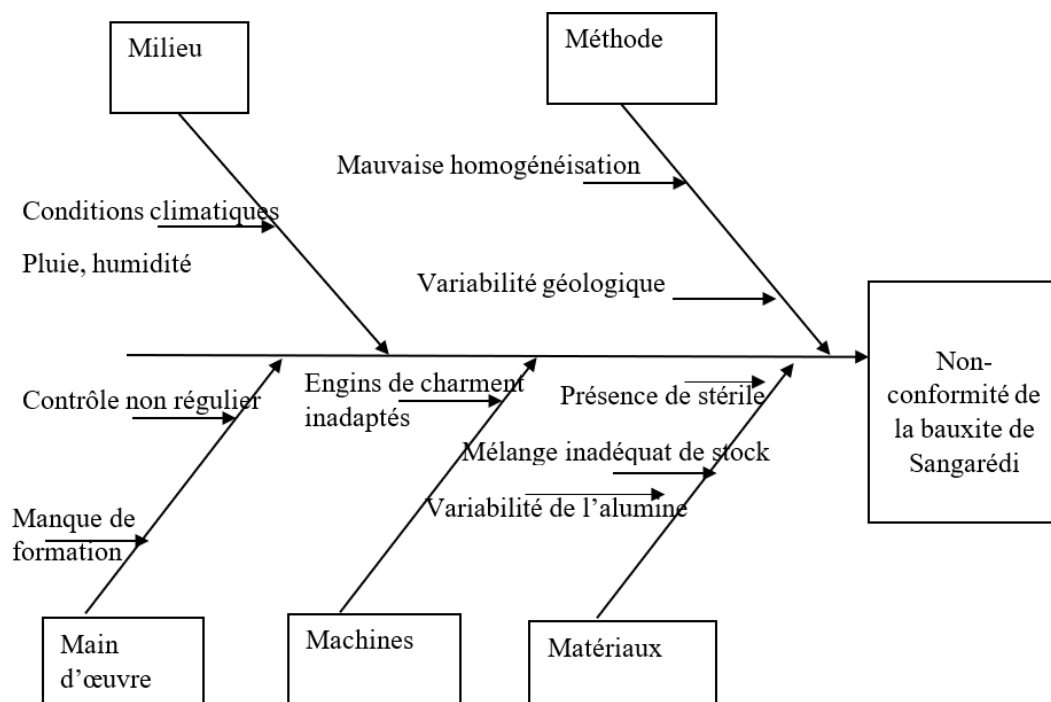


Fig. 4. Diagramme D'Ishikawa des causes de non-conformité de la bauxite de Sangarédi

Principales causes de non-conformité de la bauxite de Sangarédi:

Le diagramme d'Ishikawa, appliqué à la bauxite de Sangarédi, formalise l'ensemble des causes susceptibles de provoquer la non-conformité du produit à destination du marché export... Les causes sont regroupées selon les 5M aidant à la structuration classique en fonction du milieu, de l'homme, de la machine, des méthodes, et la matière, code utilisé pour l'analyse des causes dans le domaine minier.

- Pour ce qui est de la **main-d'œuvre**, des erreurs du service de manutention, trop peu de formation des opérateurs et peu de surveillance technique sont un facteur de qualité.
- A propos des **méthodes**, des défauts d'homogénéisation des stocks, un mélange d'un minerai de différents plateaux mal contrôlé et l'absence de protocoles de contrôle adaptés accroissent une variabilité des teneurs qui concerne surtout la silice.
- Au niveau **matériel**, des équipements de chargement inappropriés et des problèmes de calibrage du spectromètre induisent des erreurs analytiques qui rendent les résultats peu fiables.
- Concernant **l'environnement (milieu)**, la variabilité géologique dans les gisements et les conditions climatiques (pluie, humidité) influencent la composition chimique du minerai et accentuent les écarts aux spécifications contractuelles de la qualité.
- Au niveau de la **matière**, la présence de stériles, la variabilité de l'alumine et surtout sa teneur en silice trop importante constituent avant tout des causes majeures de non-conformité à la qualité.

Tableau 5. Principales causes de non-conformité de la bauxite de Sangarédi

Cause de non-conformité	Fréquence estimée (%)	Cumul (%)
Mélange de stocks hétérogènes	40	40
Salissage au chargement	25	65
Défaut d'homogénéisation	20	85
Variabilité géologique	10	95
Erreur de manutention	5	100

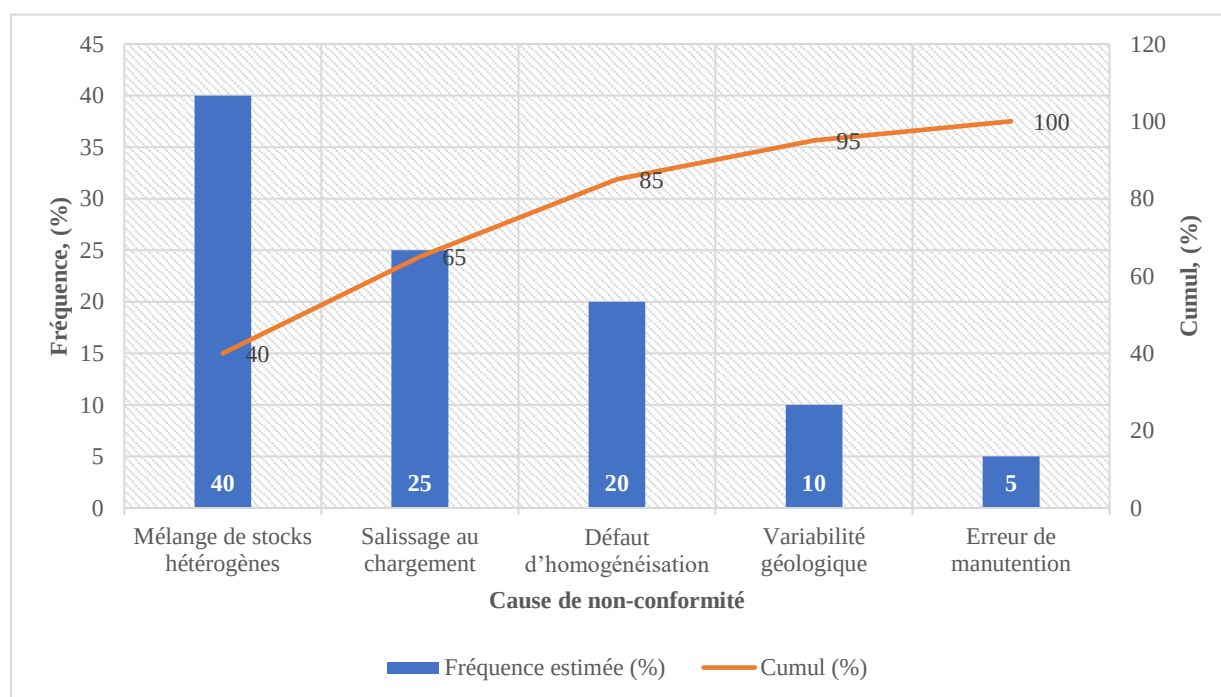


Fig. 5. Diagramme de Pareto des causes de non-conformité

Interprétation: Le diagramme de Pareto a été élaboré à partir des résultats analytiques de la bauxite de Sangarédi en mettant en évidence les principales causes des non-conformités des paramètres chimiques ayant des impacts sur la qualité à l'export. Les valeurs analysées montrent que:

- Le dépassement du seuil de la silice réactive (SiO_2) constitue la cause majeure avec environ 45 % des non-conformités tenant compte des résultats des analyses ayant livré une moyenne de 2,38 % de SiO_2 , au-delà la limite contractuelle de $2,01 \pm 0,3$ % pour des cas excédentaires devant impliquer soude caustique supplémentaire avec un rendement d'autant plus affecté par la nécessité d'en retirer une partie inadaptée dans le procédé Bayer.
- Le non-mélange homogène des matériaux en provenance de gisement présentant des valeurs lithologiques différentes est responsable à hauteur d'environ 25 % des écarts relevés. En effet les différents niveaux de SiO_2 et Al_2O_3 aux limites des plateaux retouchent la variabilité des résultats.
- Les opérations de chargement et de transport sont à l'origine de la présence d'argiles et de contaminants issus des stériles dans 20 % des non-conformités. De plus, l'introduction accidentelle de matériaux non bauxitiques a pour effet de diminuer la valeur chimique des livraisons à l'exportation. Des erreurs d'homogénéisation des stocks en aires de stockage représentent 10 % des écarts et confirment la nécessité d'une organisation rigoureuse et d'un suivi efficace des mélanges.

En outre, il ressort du diagramme que la règle des 80/20 de Pareto s'applique bien à notre domaine, les deux premières causes de non-conformité (dépassement la silice et hétérogénéité des mélanges) représentant environ 70 à 75 % des situations problématiques. Dès lors, en priorité, en réduisant la silice réactive et en améliorant l'homogénéisation des mélanges, il est possible de réduire les écarts de qualité afin d'atteindre une meilleure conformité des produits exportés.

Pour cette étude, les données proviennent de plusieurs sources complémentaires. Nous avons d'une part collectée des échantillons de bauxite directement sur les gisements des plateaux de Sangarédi et de plusieurs zones adjacentes, afin d'évaluer la composition chimique du minerai en place. Nous avons également prélevé d'autre part des échantillons au niveau des stocks intermédiaires et des sites de chargement, pour analyser les variations de qualité sur l'ensemble de la chaîne de production. Ces échantillons ont en effet permis la mesure des paramètres critiques de qualité de la bauxite, notamment l'alumine (Al_2O_3) et la silice réactive (SiO_2) qui déterminent tant la valeur marchande que l'aptitude au processus Bayer. Les résultats analytiques, fournis par le laboratoire de la CBG par fluorescence X (XRF), montrent que l'alumine détient une moyenne de 49,66 % Al_2O_3 par rapport à une teneur contractuelle de $50,01 \pm 1,5$ %, soit un écart moyen de 0,85 %.

De son côté, la silice est notée très instable, avec sa valeur moyenne en SiO_2 , établie à 2,38 %, qui dépasse la limite contractuelle de $2,01 \pm 0,3$ % et se pairant de cette non-conformité pouvant durcir la qualité à l'export. Il est alors prévu un prélèvement d'échantillons suivant un protocole aléatoire stratifié, suivi d'une homogénéisation, séchage puis broyage, ce dans le souci d'une représentativité de l'ensemble des plateaux étudiés et répertoriés de toutes les variations lithologiques.

3.4 IMPLICATIONS POUR LA QUALITE À L'EXPORT

Les résultats de l'étude confirment que la bauxite de Sangarédi présente une teneur en alumine stable et répond à la norme internationale, mais que le non-respect de la norme et la présence excessive de silice réactive, sont le principal obstacle à sa compétitivité à l'exportation. Pour améliorer la qualité, plusieurs niveaux d'actions sont préconisés, en particulier le renforcement des opérations de production et des opérations de manutention, l'amélioration de la gestion des stocks et l'homogénéisation du produit, afin de limiter la variabilité de la silice gazeuse réactive et mieux répondre aux spécifications contractuelles [8], [19].

L'instabilité observée des teneurs en SiO_2 , avec des valeurs dépassant localement la limite contractuelle (2,01 %), engendre un impact économique non négligeable dans le procédé Bayer. En effet, chaque augmentation de 1 % de SiO_2 réactive induit une consommation additionnelle d'environ 1,3 à 1,5 kg de NaOH par tonne de bauxite. Dans le cas présent, l'excès moyen de 2 % correspond à un surcoût estimé d'environ 1,5 USD par tonne de bauxite, soit près de 23 millions USD par an pour une production de 15 Mt. Cette estimation souligne la nécessité d'un contrôle rigoureux de la silice à toutes les étapes de la chaîne d'exploitation afin d'optimiser la rentabilité du traitement.

Il existe des solutions techniques telles que le prétraitement de la bauxite par lavage, le tri granulométrique ou concentration gravimétrique, qui permettent de réduire la teneur en silice réactive et d'augmenter le rendement en alumine lors du procédé Bayer [23]. L'intégration de ces méthodes, en synergie avec une qualité de contrôle stricte et une gestion différenciée des lots en fonction de l'origine des parts, pourrait améliorer la bonne valorisation de la bauxite de Sangarédi, renforçant ainsi sa compétitivité sur le marché international.

4 CONCLUSION ET RECOMMANDATION

La consultation des résultats analytiques concernant les éléments constitutifs du minerai de bauxite de Sangarédi a permis de mettre en lumière des évolutions contrastées pour les deux principaux composants déterminants de la qualité et de l'exploitabilité de ce minerai, à savoir l'alumine (Al_2O_3) et la silice réactive (SiO_2). En effet, l'alumine présente une stabilité générale, avec une teneur moyenne estimée à 49,66 %, très proche de la valeur contractuelle de $50,01 \pm 1,5$ %, puisqu'environ 90 % des échantillons analysés sont situés dans la zone de tolérance validant ainsi que la bauxite de Sangarédi a une bonne aptitude pour le procédé Bayer et un fort potentiel pour l'exportation sur le marché dans le monde [8].

Inversement, la silice réactive provoque un fort écart avec une moyenne de 2,38% alors que la spécification est de $2,01 \pm 0,3$ %; en effet, seuls 40% des échantillons sont conformes et 60% au-delà de la norme, ce qui génère de manière répétitive un handicap avec une surconsommation de soude caustique et un rendement en alumine diminué, deux éléments pénalisants directement pour la rentabilité et la compétitivité de la bauxite exportée [24].

En considérant ces constats, plusieurs actions d'amélioration peuvent être envisagées, à savoir : (i) le renforcement du contrôle qualité en continu, notamment sur la silice, par le biais de carte de contrôle et d'outils statistiques de suivi ; (ii) l'amélioration de l'homogénéisation des stocks pour réduire les écarts de traitement chimique existant entre gisements ; (iii) la réduction des phénomènes de salissage et de contamination lors des chargements et transports ; (iv) le traitement différencié des gisements pour un meilleur rapprochement de la composition chimique des lots constitués avec le spécifications contractuelles (Melo et al., 2020, 2020) [20].

Pour conclure, l'étude montre que la gestion de la variabilité de la silice est un facteur stratégique pour améliorer la qualité et la compétitivité des produits exportés, augmenter la valeur ajoutée de la filière bauxitique et donner à la Guinée son rôle de premier producteur mondial de bauxite [12].

REFERENCES

- [1] B. Campbell, « Negotiating the bauxite/aluminium sector under narrowing constraints », *Review of African Political Economy*, vol. 18, p. 27-49, juill. 1991, doi: 10.1080/03056249108703904.
- [2] L. Kalinichenko et Z. Novikova, « African Aluminium Industry: Structure, Problems, Potential », *Asia and Africa today*, juill. 2024, doi: 10.31857/s032150750031019-2.
- [3] J. Knierzinger, « The socio-political implications of bauxite mining in Guinea: A commodity chain perspective », *The Extractive Industries and Society*, vol. 1, p. 20-27, mars 2014, doi: 10.1016/J.EXIS.2014.01.005.
- [4] A. K. Diallo, M. S. M. Conté, O. Kaba, A. Soumah, et M. Camara, « Petrological and Statistical Studies of the Limbiko Bauxite Deposit, Republic of Guinea », *International Journal of Geosciences*, janv. 2023, doi: 10.4236/ijg.2023.144020.
- [5] D. Death, A. Cunningham, et L. Pollard, « Multi-element and mineralogical analysis of mineral ores using laser induced breakdown spectroscopy and chemometric analysis », *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, vol. 64, p. 1048-1058, oct. 2009, doi: 10.1016/J.SAB.2009.07.017.
- [6] G. Isaenko, E. Andreeva, E. Putilin, Yu. Yu. Fishchenko, et A. Makavetskas, « Influence of the material composition of the original ore on the quality of the iron ore concentrate. », *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*, oct. 2023, doi: 10.32339/0135-5910-2023-1-63-70.
- [7] G. Cheng, Y. Li, et M. Zhang, « Research progress on desulfurization technology of high-sulfur bauxite », *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, oct. 2022, doi: 10.1016/s1003-6326 (22) 66026-6.
- [8] M. C. Béavogui, B. Balmaev, O. Kaba, A. Konaté, et I. Loginova, « Bauxite enrichment process (Bayer process): Bauxite cases from Sangaredi (Guinea) and Sierra Leone », *PROCEEDINGS OF THE 16TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL MANUFACTURING AND METALLURGY (ICIMM 2021)*, janv. 2022, doi: 10.1063/5.0074812.
- [9] D. Yu et al., « Navigating the global mineral market: A study of resource wealth and the energy transition », *Resources Policy*, mai 2023, doi: 10.1016/j.resourpol.2023.103500.
- [10] F. M. AlDossari, « Upgraded Analytical Protocols in Bauxite Refining Industry Using Composite Sampling Approach to Minimize Laboratory Analysis Load », *Materials Sciences and Applications*, janv. 2023, doi: 10.4236/msa.2023.142007.
- [11] A. Carvalho, V. Alves, D. Silvestre, F. Leme, P. Oliveira, et C. Nomura, « Comparison of Fused Glass Beads and Pressed Powder Pellets for the Quantitative Measurement of Al, Fe, Si and Ti in Bauxite by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy », *Geostandards and Geoanalytical Research*, vol. 41, déc. 2017, doi: 10.1111/ggr.12173.
- [12] M. Birinci et R. Gök, « Characterization and flotation of low-grade boehmitic bauxite ore from Seydişehir (Konya, Turkey) », *Minerals Engineering*, vol. 161, p. 106714, janv. 2021, doi: 10.1016/j.mineng.2020.106714.
- [13] Y. Xu, C. Chen, et J. Li, « A Novel Sustainable and Facile Method in Alumina Industry: Pre-Treatment of High Silica Bauxite by Cyclic Alkaline Leaching », *Journal of Sustainable Metallurgy*, févr. 2025, doi: 10.1007/s40831-025-01013-6.
- [14] Y. Sun, A. Pan, Yuzhao, et J. Chang, « Extraction of alumina and silica from high-silica bauxite by sintering with sodium carbonate followed by two-step leaching with water and sulfuric acid », *RSC Advances*, vol. 13, p. 23254-23266, juill. 2023, doi: 10.1039/d3ra03362g.
- [15] L. Wei, « The Application of X-ray Fluorescence Spectrometry in Ore Composition Analysis », *Guangzhou Chemical Industry*, janv. 2012, [En ligne]. Disponible sur: <https://consensus.app/papers/the-application-of-x-ray-fluorescence-spectrometry-in-ore-wei/f4d2a7efd95b561aa2d402ea467679d0/>.
- [16] C. Xiu-Mei, « Analysis on X-ray Fluorescence Spectrometry Manganese Mine », *Gansu Metallurgy*, janv. 2009, [En ligne]. Disponible sur: <https://consensus.app/papers/analysis-on-x-ray-fluorescence-spectrometry-manganese-xiu-mei/fd9fac68ff4e570a8bd689f56533a94e/>.
- [17] M. Kar, M. A. R. Önal, et C. R. Borra, « Alumina recovery from bauxite residue: A concise review », *Resources, Conservation and Recycling*, nov. 2023, doi: 10.1016/j.resconrec.2023.107158.
- [18] G. Zhou et al., « Toward sustainable green alumina production: a critical review on process discharge reduction from gibbsitic bauxite and large-scale applications of red mud », *Journal of Environmental Chemical Engineering*, févr. 2023, doi: 10.1016/j.jece.2023.109433.
- [19] P. Smith, « The processing of high silica bauxites — Review of existing and potential processes », *Hydrometallurgy*, vol. 98, p. 162-176, août 2009, doi: 10.1016/J.HYDROMET.2009.04.015.
- [20] S. Paz, H. Kahn, et R. Angélica, « A proposal for bauxite quality control using the combined Rietveld – Le Bail – Internal Standard PXRD Method – Part 1: hkl model developed for kaolinite », *Minerals Engineering*, vol. 118, p. 52-61, mars 2018, doi: 10.1016/J.MINENG.2018.01.006.

- [21] R. Angélica, H. Kahn, et S. Paz, « A proposal for bauxite quality control using the combined Rietveld - Le Bail - Internal Standard PXRD method – Part 2: Application to a gibbsitic bauxite from the Paragominas region, northern Brazil », *Minerals Engineering*, juin 2018, doi: 10.1016/J.MINENG.2018.03.039.
- [22] L. T. P. Lopes, F. C. Fernandes, E. Da Cunha Rodovalho, et T. M. E. Hajj, « Impact assessment of waste screening over the life of a Brazilian bauxite mining operation », *Mining Technology*, vol. 130, p. 1-7, déc. 2020. doi: 10.1080/25726668.2020.1857156.
- [23] S. Dyussenova, R. Abdulvaliyev, A. Akcil, S. Gladyshev, et A. Manapova, « Gravity beneficiation of low quality gibbsite - kaolinite bauxite », *Journal of Materials Research and Technology*, août 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.07.194.
- [24] M. Kumar, B. Senapati, et C. Kumar, « Beneficiation of High Silica Bauxite Ores of India an Innovative Approach », p. 187-190, janv. 2016, doi: 10.1007/978-3-319-65136-1_33.

