

INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATION AND SCIENTIFIC RESEARCH

Vol. 76 N. 1 December 2024



International Peer Reviewed Monthly Journal



International Journal of Innovation and Scientific Research

International Journal of Innovation and Scientific Research (ISSN: 2351-8014) 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

GMM-s Based on Radius Vectors with Directly Included Azimuth <i>Snezana Gjorgji Stamatovska</i>	1-22
Design and implementation of a notification and geo-localisation system for the mobility of students and staff at Kimpa Vita-Uíge University <i>Kundakama Mpanda, Belarmino Garcia António, Bilolo António Vemba, Nzakiese Mbongo, Mavambu Diankatu, BAZANGIKA MFUMUANENE Victoire, and Nsuadi Kiese Glodi</i>	23-38
Avocado Oil Extraction (Persea Americana Mill) by Laboratory and Artisanal Methods <i>Nswadi Kinkela, Nswadi Nsavi Metos, Athos MPANDA MAKAMBUA, Lukuama Ngesevua Bienvenu Doudou, and Jesus Miguel López Rodilla</i>	39-47
Impact à long terme des amendements phosphatés sur la dynamique du fer dans les sols rizicoles acides touchés par la toxicité ferreuse au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire <i>Kouassi Pla ADOU, Konan-Kan Hippolith KOUADIO, Affi Jeanne Bongoua-Devisme, Franck Michaël Lemonou BAHAN, and Anselme Kan Louis KOKO</i>	48-62
Analyse des facteurs psychologiques influençant la motivation des élèves des CEG de Bembéréké envers les mathématiques <i>N. S. HOUÉHA, D. I. SAVI, and Pagnamam POROMNA</i>	63-69
Modélisation et simulation d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation <i>Agnimoan Constant ALIHONOU, Léandre Mathias VISSOH, Jules Anicet YAMONCHE, Jonas EDOU, Victorien CHEGNIMONHAN, and Clotilde Tognon GUIDI</i>	70-79
Caractérisation du complexe granitique d'Issia (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire) par la méthode de la fluorescence X portable (pXRF) <i>Brou Koffi Joseph, Teha Koffi Raoul, Kouassi Brice Roland, and Kouamelan Alain Nicaise</i>	80-92
Pollution plastique des rivières de Kinshasa: Mise en évidence de la contamination aux microplastiques de l'hydrosystème du Pool Malebo (fleuve Congo) à Kinshasa (RD Congo) et risque sur la santé des touristes <i>Masua Tchomba Basile, Kaki Ngisila Blanchard, Musibono Eyul'Anki Dieudonné, Victor Pwema Kiamfu, and Kayembe Sungula Jean</i>	93-126

GMM-s Based on Radius Vectors with Directly Included Azimuth

Snezana Gjorgji Stamatovska

Geotechnics and Special Structures, University «Ss Cyril and Methodius», Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, City Skopje, North Macedonia

Copyright © 2024 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: Based on radius vectors, a verified new GMM with directly included azimuth has developed. It has been fitted into a generated databank computed by use of an originally developed method-generator of data for regression analysis. Records of strong earthquakes that occurred in 1977, 1986 and both earthquakes that took place in 1990 in the Vrancea zone in Romania have been used.

KEYWORDS: recorded seismic field, normalized seismic field, corrected epicentral distance, recorded PGA, generated PGA, expected PGA.

1 INTRODUCTION

The prognosis of seismic effects is of a particular importance since it provides an estimation of the intensity of the seismic hazard. The quantitative parameters of ground motion, namely, the amplitude and the frequency content of the seismic waves and vibrations, the time duration of an earthquake and the permanent ground deformations depend on the energy and the dimensions of the foci, the mechanism of motions at the foci, the distance between the focus and a structure, the geological composition of the environment through which the seismic waves propagate and the soil conditions under a structure. Mathematically, all these factors can hardly be taken into account, which results in a huge number of empirical mathematical models of GMM-s and methods of their development ([5], [6]).

1.1 STATE-OF-THE ART REFERRING TO GMM-S WORLDWIDE

The need and primary purpose of human existence on the Earth is to provide seismic safety of structures. With the use of the first records obtained by instruments in the USA in 1933, there started the empirical prediction of ground motion under earthquake effect not only in the USA but in a number of regions worldwide (Japan, Italy, Romania, Turkey, former Yugoslavia, etc.).

The first developed empirical equations - GMM-s ([5]), have so far undergone a number of modifications from the aspect of both mathematical form and methods of their development. According to the author, a considerable progress has been made by use of the method of double regression analysis that enabled better inclusion of the characteristics of each occurred earthquake in the equation ([2]).

The importance of the number of records for development of a GMM equation on one hand and having an insufficient number of records from a focus on the other hand, conditioned the use of created databanks on different foci in a country (for example, USA - west and east), Italy, Japan, Romania, former Yugoslavia, etc.) that further progressed in creation of European (European Strong Motion data –ESMD), American (West 2 data set, USGS database, IEEE database) and World databanks.

Up till now, as a result of the use of as many as possible data from different regions and foci, there have been obtained long and complex mathematical equations - GMM-s for empirical prediction of ground motion. An example is the generation of GMM-s for the USA, the so called NGA-Next Generation Attenuation ([6]). These include different definitions and sizes of magnitude and distance, types of fault structures, effect of local soil conditions, “statistic focal depth” - obtained by regression

analysis, standard deviations - functions of magnitude or peak ground acceleration PGA, limited use of standard deviations per magnitude, limited use per distance and alike ([6], [36]).

The need for zoning, development of regulations and providing long-term strategies for seismic protection of a region or a country, in conditions of insufficient support by own data on occurred earthquakes, has led to use of GMM-s equations developed for a region or a country for another region or a country. Therefore, in addition to methods where GMM is developed from data - **forward to backward methods**, there have also been developed methods from GMM to data - **backward to forward methods** ([37]). The latter use GMM developed for a region/or a country to explore statistic parameters (median, mean value, standard deviation, distribution of residuals) by use of data from occurred earthquakes in another country and region, as statistic estimates of the applicability of that model ([28], [29], [3]; [18]).

The period of mathematical modeling of ground motion under earthquake effect based on the philosophy that records from an occurred earthquake, although dependent, are used as independent of a country, region and continent, represents the **early period of empirical prediction**. It is characterized by analysis and exploration of a created set of independent data and then, through long and complex mathematical-physical models, definition of the effect of the factors on which ground motion depends (magnitude, distance, local soil conditions, types of fault structures, direction of radiation, focal depth, etc.). For their use in practice, it is necessary to elaborate additional bases for certain parameters as are, for example, the shortest distance to the projection of the fault upon the surface, or the so called distance according to Joyner and Boore – R_{JB} ([10], [6]). Having no such bases, the user inserts a subjective estimation in the obtained results. Also, a larger number of them use the so called “statistic” focal depth– h_0 , which has its own effect while used in analyses of the probabilistic-PSHA and the deterministic - DSHA hazard.

The new philosophy in mathematical modeling of ground motion analyzes and explores each earthquake as a natural phenomenon that is strictly geographically and regionally dependent, treating the set of records obtained from that earthquake as dependent on each other and in relation with each other ([31], [35], [36], [38], [39]). This is a philosophy of not mixing records of occurred earthquakes from different foci in one region as well as from different geographical regions, or **a model of a single focus**.

Depending on how the record of an occurred earthquake is included and used in a databank, the GMM-s developed for the earthquakes originating from the Vrancea focus in Romania are classified into two groups. Included in the first group are GMM-s developed with a created databank on records of occurred earthquakes in which each record is included as datum that is not dependent and is not connected to all the remaining records obtained from that specific earthquake ([27], [15], [16], [41], [30]). Contrary to this case is when, in the investigation, the earthquake is included as a strictly geographically/regionally dependent event, while the records of an occurred earthquake are included as dependent on each other and in connection with each other ([31], [35], [36], [38], [39]).

The presented investigations refer to the GMM-s from the second group.

2 NEW GMM DIRECTLY DEPENDENT ON AZIMUTH

Seismic imagination ([39]) is the basis upon which a methodological approach to development of new, directly dependent on azimuth GMM, has been developed. With it, the earthquake is analyzed and included in GMM as an integral event, whereas all records of that earthquake are included as dependent on each other and in relation to each other.

2.1 MATHEMATICAL EQUATION

A general empirical GMM ([10]) has been used for soil type - rock (equation 1)

$$\ln Y = b + b_M M + b_R \ln R_h + P \sigma_{\ln Y} \quad (1)$$

Where,

Y - maximum peak horizontal acceleration-PGA, in cm/s^2

M - Richter's magnitude

R_h - hypocentral distance in km

b, b_M, b_R - regression coefficients

P - variable with the value of zero and unity for median and median plus one standard deviation, respectively

The term dependent on distance - R has been studied separately. A recorded seismic field represented by radius vectors has been used (Figure 1). From it, by scaling for a selected azimuth, the normalized seismic field has been defined, Figure 2 ([38]).

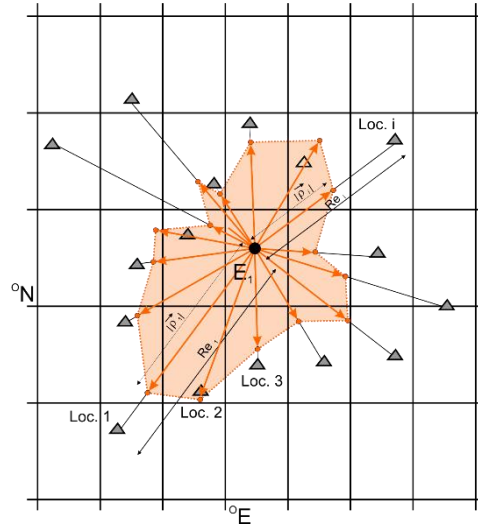


Fig. 1. Recorded seismic field of PGA

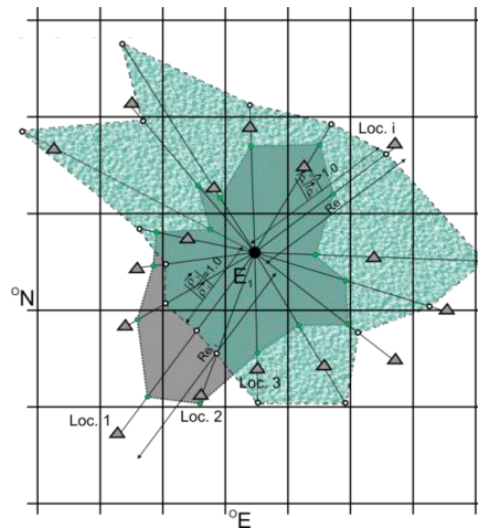


Fig. 2. Normalized seismic field according to location 1

The normalized seismic field represents the relative ratios of modules $\frac{\rho_i}{\rho_L}$ or $\frac{\rho_L}{\rho_i}$, where $\rho_i = |PGA_i|$. These are dimensionless and the corresponding epicentral distances are multiplied by them and **corrected epicentral distances**- R_e^c (equation 2) are computed. This is done separately for each occurred earthquake from a single seismic focus. The hypocentral distance computed with the corrected epicentral distance- R_e^c and hypocentral depth- h is the **corrected hypocentral distance**- R_h^c (equation 2).

$$(R_h^c)^2 = (R_e^c)^2 + h^2, R_e^c = R_e \frac{\rho_L}{\rho_i}, \frac{\rho_L}{\rho_i} = \frac{|\vec{\rho_L}|}{|\vec{\rho_i}|} \quad (2)$$

where:

ρ_i - the module of the radius vector in respect to any location of instrument - i

ρ_L - the module of the radius vector in respect to location- L(x_L ; y_L) by which the seismic field is normalized

Re - epicentral distance in km

R_e^c - corrected epicentral distance in km
 h - focal depth in km
 R_h^c - corrected hypocentral distance in km

If the position of the instrument location is also defined with the coordinates of the end point of the radius vector- Loc= $L(x_L; y_L)$, then the value of the epicentral distance is defined from the following equation:

$$R_e = \sqrt{(x_L)^2 + (y_L)^2} \quad (3)$$

where,

$$tg\beta_L = \frac{x_L}{y_L} \rightarrow x_L = y_L tg\beta_L, y_L = R_e \cos \beta_L \quad (4)$$

and,

$$\ln Y = b + b_M M + b_R \ln (\sqrt{y_L^2 (1 + tg^2 \beta_L) + h^2} + P\sigma_{\ln Y} \quad (5)$$

or,

$$\ln Y = b + b_M M + b_R \ln (\sqrt{(R_e \cos \beta_L)^2 (1 + tg^2 \beta_L) + h^2} + P\sigma_{\ln Y} \quad (6)$$

In equations 3 through 6,

- x_L and y_L are the geographic longitude and latitude of the location for which we compute the GMM/or instrument location, in radians or degrees,
- β_L is the azimuth of the location for which we define the GMM/or instrument location, in radians or degrees.

Equations 5 and 6 are the equations for the new GMM with directly included azimuth. They are equally applicable for both shallow and subduction earthquakes as well as for all parameters of ground motion and its amplitude-frequency content.

2.2 METHOD

A multi-linear regression analysis has been used for assumed normal distribution for $\ln Y$, which is a dependent parameter, while independent parameters are magnitude M and the corrected hypocentral distance- R_h^c (equation 2). The data for the regression analysis have been computed by use of an originally developed general method - generator of data for regression analysis (Enclosure A). The method uses real recorded seismic field from an occurred earthquake and all its normalized seismic fields. The mathematical algorithm for the computation of the data for the regression analysis is as follows:

$$\ln Y_{i,j_i} = b + b_M M_i + b_R \ln \left(\sqrt{y_{i,j_i}^2 (1 + tg^2 \beta_{i,j_i}) \left(\frac{\rho_{L=i,j_i}}{\rho_{i,j_i}} \right)^2 + h_i^2} \right) + P\sigma_{\ln Y}$$

for

$$i = 1, \dots, n, j_i = 1, \dots, m_i \quad (7)$$

where,

- i refers to occurred earthquakes originating from a single focus or $i = 1, n$.
- n is the total number of occurred earthquakes originating from a single seismic focus
- j refers to records obtained from each occurred earthquake, or $j_i = 1, m_i$
- m_i is the total number of records obtained from a single earthquake
- L is the instrument location according to which we normalize the recorded seismic field

If, for example, the number of records related to an occurred earthquake is 21, then 21 normalized seismic fields are obtained from it, each with 21 data, or a total of 441 data in the databank for regression analysis, related to that earthquake only. The total number of data is the sum of the computed data from all earthquakes from a single focus

The computed R_e^c and R_h^c are used only for computation of data for regression analysis, whereas R_e and R_h are used in practical application of GMM since the following holds: when $\rho_i = \rho_L$, then $R_e^c = R_e$ and $R_h^c = R_h$.

3 VERIFICATION OF THE METHOD

Verification of the method has been done by use of records of occurred intermediate earthquakes from the Vrancea focus, obtained from the strong earthquakes that occurred in 1977, 1986 and both earthquakes that occurred in 1990 ([31]; [38], [39]).

3.1 VRANCEA ZONE

The impact of the seismic energy generated at the intermediate foci in the Vrancea zone (Romania) upon the wider region is big. It has been confirmed with the historic and instrumental data on the occurred catastrophic earthquakes ([7], [17]; [25], [26], [23], [24]), the lost human lives and the inflicted material losses. Its impact in the past and the impact that it could have on the area of central and southeast Europe in future ([19], [20], [21], [22], [11], [12], [13], [14], [31], [32], [33]) was and remained a strong challenge and motivation for the author ([34], [35], [36], [38], [39]). All this required and requires a constant consideration and familiarization with the characteristics of the intermediate earthquakes from this seismic zone ([7], [17], [25], [26], [23], [24]).

3.2 DATA FOR REGRESSION ANALYSIS

Available from the occurred four earthquakes (1977, 1986, 1990/1 and 1990/2) were 190 horizontal components for type of soil - rock ([31], [38]) and the same number for type of soil - soil, all in the form of corrected time histories of acceleration. The number of horizontal components amounted to 4, 48, 81, and 57, successively following the occurred earthquakes (Figure 3, right). Obtained from these were 2, 24, 42 and 29 (a total of 97) data when the larger of the two horizontal components was used (Figure 3, left).

These data are distributed as follows: magnitude $M_L=6.1-7.2$, focal depths $89\text{ km} \leq h \leq 131\text{ km}$, epicentral distances $R_e= (12.315 - 472.380) \text{ km.}$ or $R_h= (89.947 - 472.793) \text{ km.}$ and azimuths of $\beta \left(ONS_{\frac{90}{1}}\right) = 1.057^0$ to $\beta \left(ONS_{\frac{90}{2}}\right) = 347.380^0$. The minimal and maximal values of epicentral and hypocentral distances were obtained at instrument locations VRI^{90/2} and NIS⁷⁷, respectively.

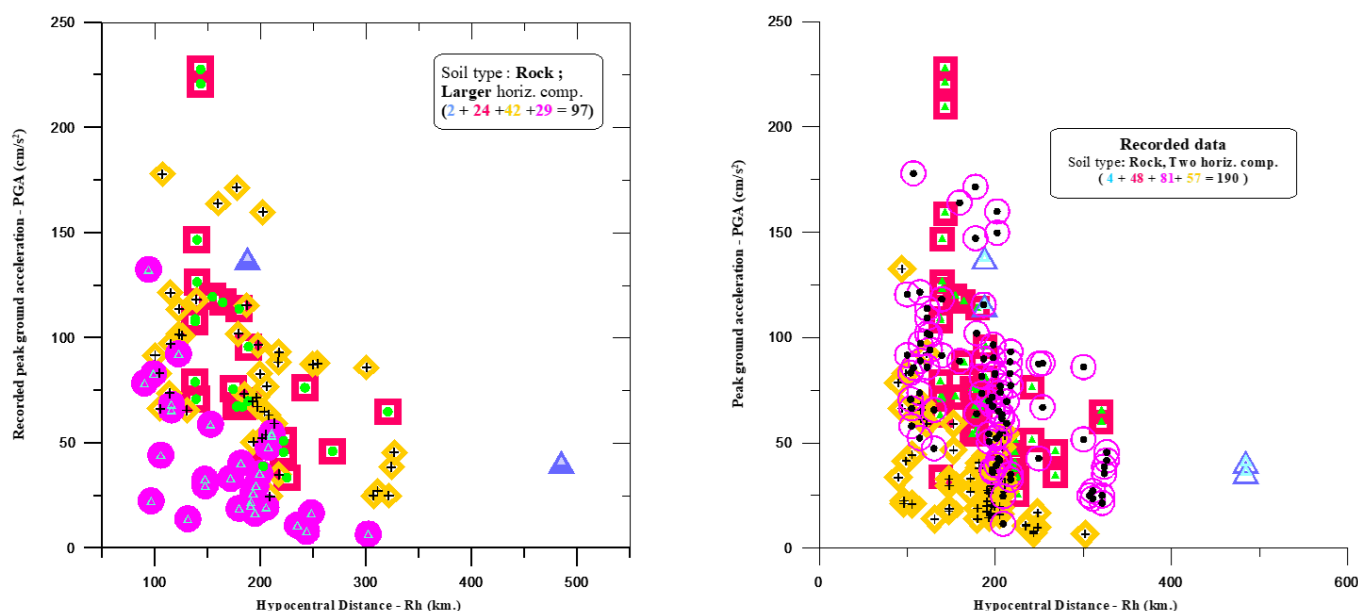


Fig. 3. Distribution of PGA recorded, for type of soil – rock (the greater of the two horizontal components - left and two horizontal components - right)

3.3 GMM-S FOR ENTIRE REGION

Four GMM-s have been developed for the entire region, or for azimuths $-\beta$ between 0° and 360° . Out of these, two refer to soil type - rock (SS20-RL and SS20-RA), both for soil type - soils (SS20-SL and SS20-SA). For one type of soil, one of the models has been defined by application of the greater of the two horizontal components (labeled L), while the second has been defined by application of both horizontal components (labeled A).

The total number of data generated for regression analysis, computed by use of equation 7, was 3185 and 12130, when the greater of the two horizontal components and both horizontal components were used, respectively. The graphically computed peak horizontal accelerations - $PGA^{\text{computed/generated}}$, for soil type - rock are shown in Figure 4, respectively, left and right.

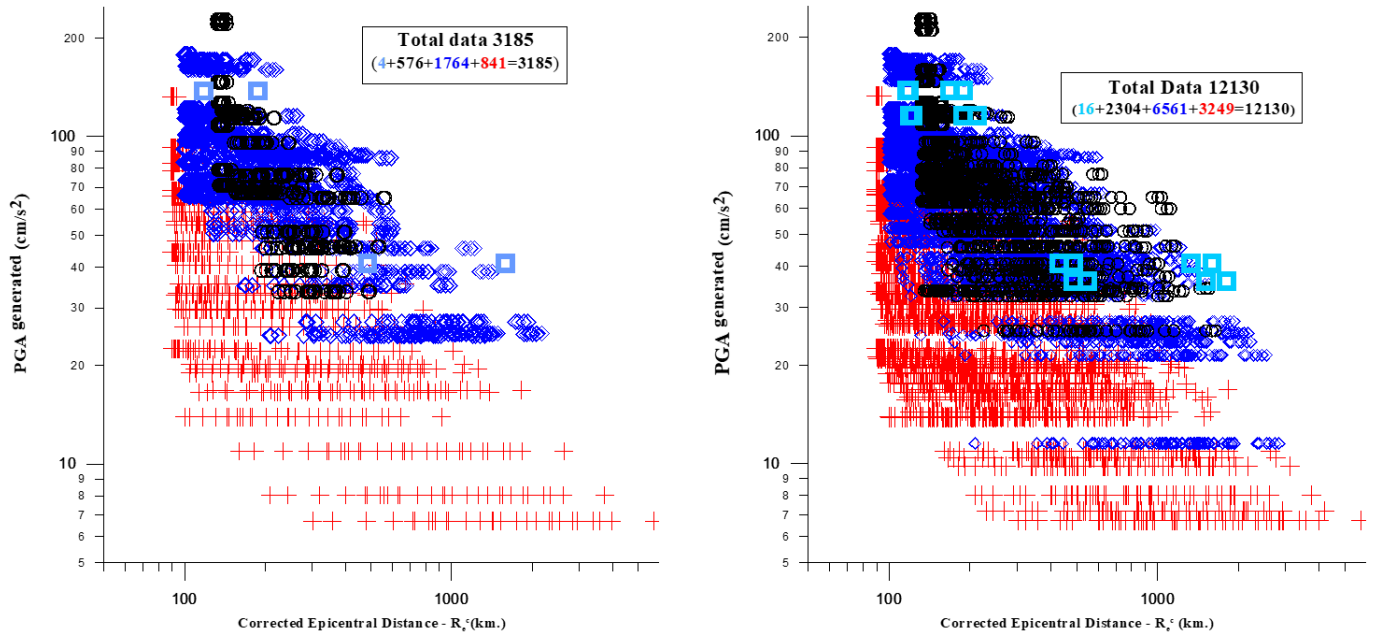


Fig. 4. Distribution of $PGA^{\text{computed/generated}}$, for soil type – rock (greater of the two horizontal components - left and two horizontal components - right)

It is important to note that PGA^{computed} contain the originally recorded PGA^{recorded} . These are with invariable values of both PGA^{recorded} and epicentral/or hypocentral distance ($R_e^c = R_e$ and $R_h^c = R_h$), since $\rho_i = \rho_L$ holds for them. This is graphically presented in Figure 5. It shows PGA^{computed} and PGA^{recorded} , with different colors and symbols, respectively for the four occurred earthquakes of 1977, 1986, 1990/1 and 1990/2.

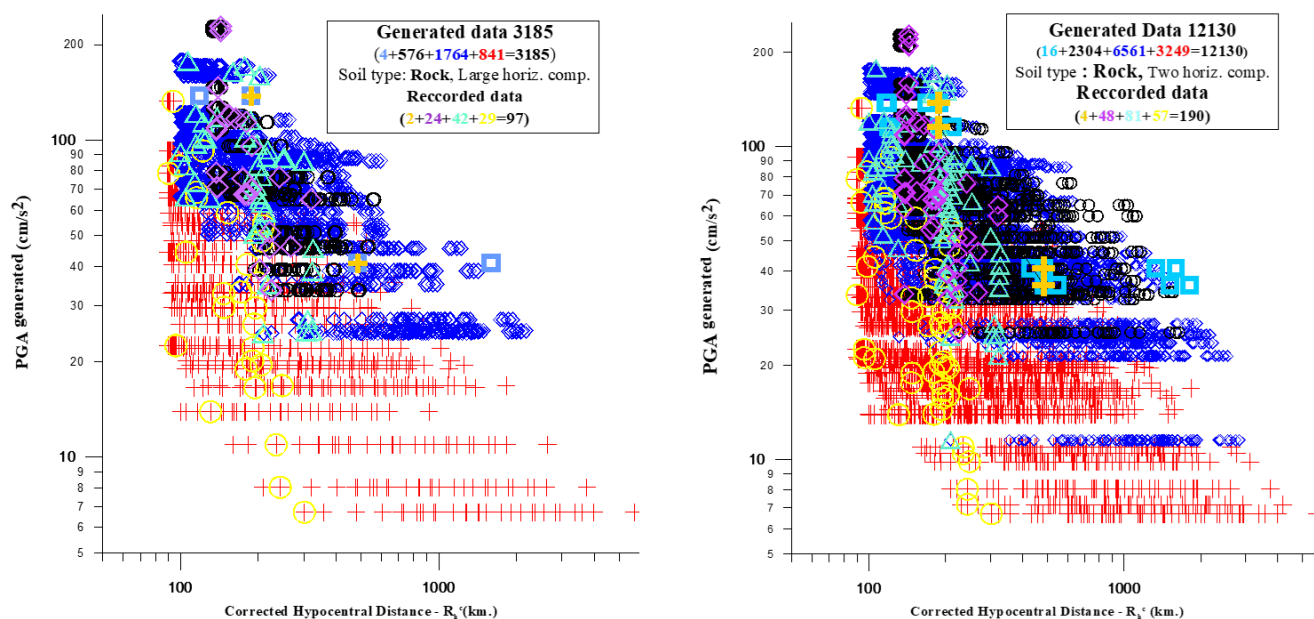


Fig. 5. Graphic presentation of $PGA^{recorded}$ (97 and 190 data), for soil type - rock, and $PGA^{computed}$ (3185 and 12130 data, left and right, respectively).

PROOF:

For a selected instrument location, from an occurred earthquake, we graphically present the values of $PGA^{recorded}$ and $PGA^{computed}$, for the case when normalization is done according to that instrument location. Taken for an example are the recorded (red symbol) and the computed accelerations (blue symbols) of the earthquake of 1986, for the instrument location FOC (Figure 6). The figure shows that there is no change of value of the recorded acceleration and the epicentral distance of the instrument location at which it is recorded.

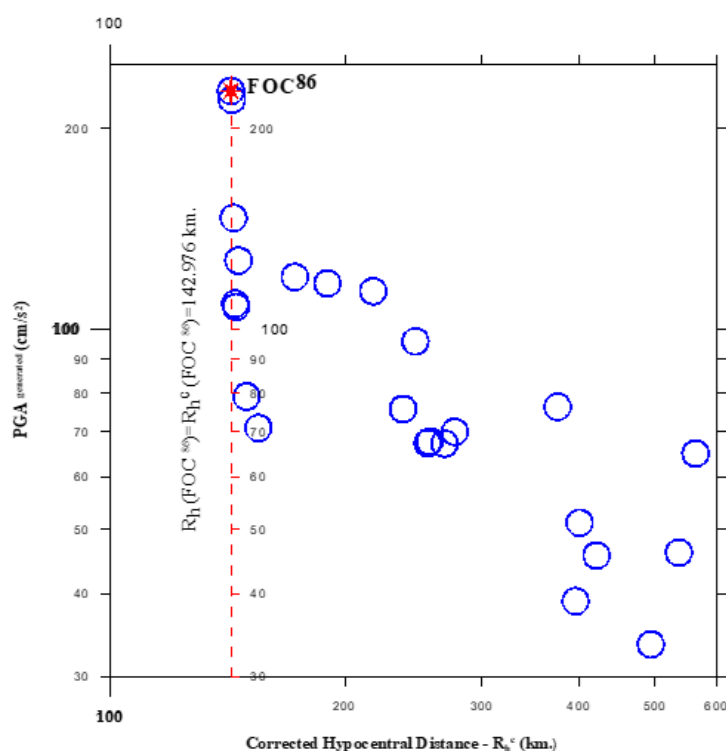


Fig. 6. Location FOC - Recorded acceleration and computed accelerations of the earthquake of 30 August 1986.

3.4 REGRESSION ANALYSIS AND RESULTS OBTAINED

A multi-linear regression analysis has been carried out for an assumed normal distribution of the natural logarithm of the ground motion parameter – $\ln Y$, (Equation 6). In it, the peak horizontal ground acceleration- $\ln PGA$ is a dependent parameter, whereas independent parameters are: earthquake magnitude- M and corrected hypocentral distance - R_h^c (Equation 2). Four regression analyses have been carried out. The results of the regression analyses are: constants/regression coefficients (b, b_M and b_R) with their standard deviations - SD, confidence intervals defined with a probability of 95% as well as conditional standard deviation ($\sigma_{\ln PGA}$), all given in Table 1.

Table 1. Results from regression analyses

$$\text{Mathematical model: } \ln PGA = b + b_M M + b_R \ln \sqrt{(R_e \cos \beta)^2 (1 + t g^2 \beta) + h^2} + P \sigma_{\ln PGA}$$

GMM-s Type of soil	Constants		Standard deviation - SD	Confidence interval with probability of 95%		$\sigma_{\ln PGA}$
SS20-RL Rock (Greater comp.)	b	-0.4097	0.14960	-0.7029	-0.1165	0.3814
	b_M	1.1790	0.02127	1.1370	1.2210	
	b_R	-0.6123	0.00963	-0.6312	-0.5935	
SS20-RA Rock (Two comp.)	b	-0.8859	0.07977	-1.0420	-0.7296	0.3997
	b_M	1.2260	0.01130	1.2040	1.2490	
	b_R	-0.6055	0.00529	-0.6159	-0.5951	
SS20-SL Soils (Greater comp.)	b	-0.2641	0.15070	-0.5594	0.0312	0.3836
	b_M	1.1900	0.02140	1.1490	1.2320	
	b_R	-0.6082	0.00981	-0.6274	-0.5889	
SS20-SA Soils (Two comp.)	b	-0.7161	0.08113	-0.8751	-0.5571	0.4060
	b_M	1.2370	0.01148	1.2140	1.2590	
	b_R	-0.6043	0.00542	-0.6149	-0.5937	

Applying the results from Table 1, PGA^{expected} for the earthquake that occurred on 30th August 1986 ($M=7.0$, $h=131$ km. and $\beta_{BUC}^{86} = 196.251^\circ$) and 30th August 1990 ($M=6.7$, $h=99$ km. and $\beta_{BUC}^{86} = 201.165^\circ$) has been computed. The comparison between the recorded (PGA^{recorded} - pink symbols), the computed for regression analysis (PGA^{computed} - black symbols) and the expected as median + 1 standard deviation (PGA^{expected} - green symbols) and median (PGA^{expected} - red symbols) for the earthquakes of 1986 and 1990/1 is given in Figure 7, left and right, respectively.

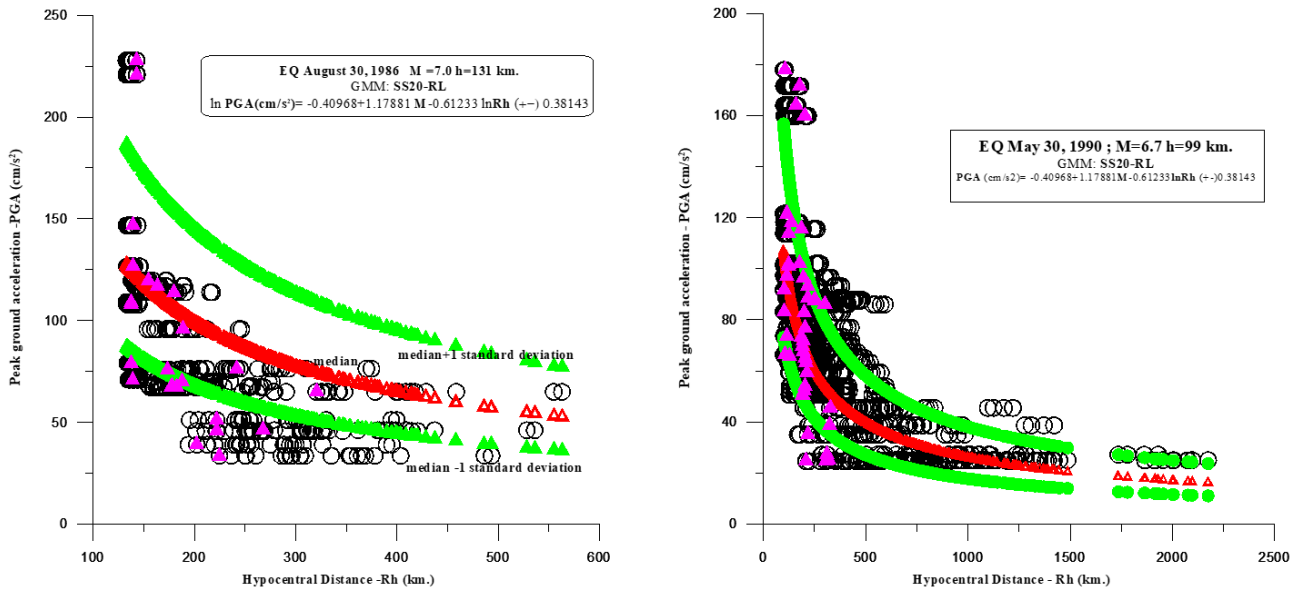


Fig. 7. Earthquakes: 1986 and 1990/1- recorded, computed and expected PGA (cm/s²), (24, 576, 576) and (42, 1764, 1764), left and right, respectively

3.5 DISCUSSION ABOUT RESULTS OBTAINED

The results obtained from the regression analyses (Table 1) show that the values of the conditional standard deviation- $\sigma_{\ln PGA}$ are between 0.38143 and 0.40603, those of the regression coefficients per distance $-b_R$ are between -0.60432 and -0.61233, and those of the regression coefficients per magnitude $-b_M$ are between 1.17881 and 1.23679.

The values on the left and the right boundary of the confidence intervals for b_M and b_R are very close between themselves, which points to good fitting of the mathematical equation in the computed data for regression analysis. For example, the value of the magnitude dependent regression coefficient for GMM SS20-RL, is $b_M = 1.179$, whereas the left and the right boundary of its confidence interval are [1.137, 1.221]. The same holds also for the distance dependent coefficient, $b_R = -0.6123$, with confidence interval [-0.6312; -0.5935]. The conditional standard deviation for this model is the least and amounts to 0.38143. This points out that the scattering of data around the computed mean value is very small or that there is very good fitting of the model per both distance and magnitude. This is also proved through the distribution of the computed residuals per distance (Fig. 8). It shows that only the earthquake of 1990/2 has a very small number of residuals that are between -1 and -1.50, whereas for all other earthquakes, the distribution is between +1 and -1. This discussion also holds for all the remaining models of ground motion in Table 1.

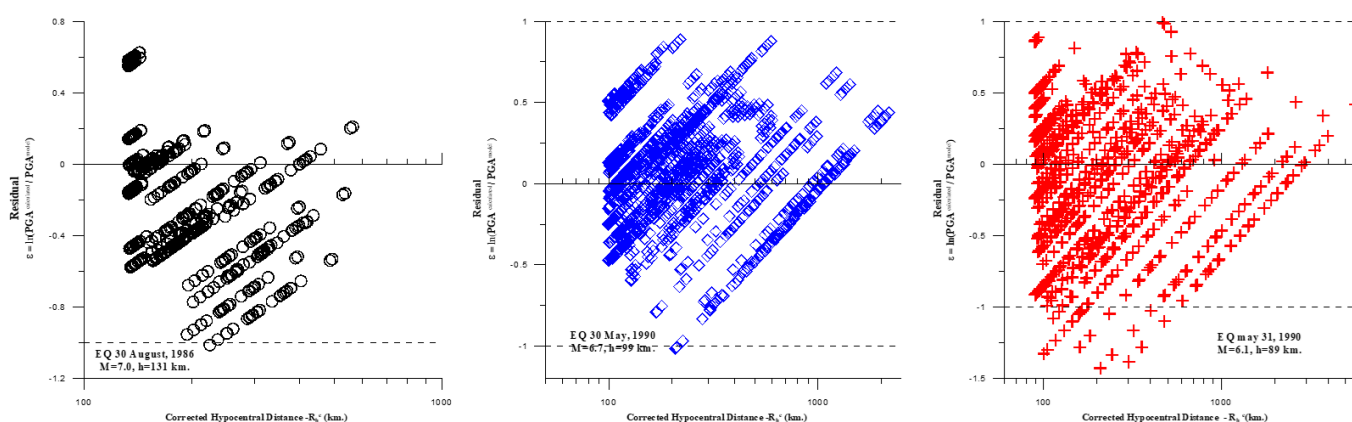


Fig. 8. Distribution of residuals per distance for the earthquakes of 1986, 1990/1 and 1990/2, for GMM SS20-RL.

The distributions of $PGA^{computed}$ (symbol- a black circle in Figure 7, left and right) and the residuals per distance (Figure 8) show that the developed mathematical equations in these investigations are not limited per epicentral/or hypocentral distance, but are supported by the data computed for regression analysis for much larger epicentral/or hypocentral distances. This is in accordance with the character of the intermediate earthquakes from the Vrancea zone, felt at very large distances in central and southeastern Europe ([7]; [17]), i.e., with the size of the earth's volume through which the seismic waves propagate.

This proves that, through the developed method of generation of data for regression analysis, there have been defined and included the information contained in the obtained records of occurred earthquakes referring to the effect of the focal mechanism, the size of released energy, the volume of earth affected by seismic waves and its transmission characteristics. Therefore, the developed mathematical model (equation 5 or 6) and the method for computation of data for regression analysis (Enclosure A, equation 7) in which the equation has been fitted, are advantageous over all other mathematical equations and methods for their development in which there is limitation of distance, which in turn, is connected with the distances at which the used records of occurred earthquakes were obtained ([30]; [41], [4]).

All this has been achieved through analysis and investigation of each occurred earthquake as an integral natural phenomenon that is strictly regionally dependent, whereas the obtained records have been treated as dependent on each other and in relation with each other ([31], [38], [39]).

3.6 COMPARISON WITH GMM-S OF OTHER AUTHORS

For the purpose of comparison, the ground motion models developed for intermediate focus earthquakes from the Vrancea focus in Romania have been divided into two groups. The first group includes those developed with data on occurred strong deep focus earthquakes from the Vrancea focus of 1977, 1986, 1990/1 and 1990/2 ([26], [16], [17]), without their classification per type of soil. In this group, there also belongs the model developed by Sokolov et al. ([30]), who, in addition to data on

intermediate focus earthquakes, also uses data on shallow earthquakes from the Vrancea zone, the model being developed for soil type - rock. In addition to records of earthquakes from the Vrancea focus, the second group also includes records from other countries worldwide ([41], [4]).

The mathematical equations for GMM-s with which comparison has been made are the following:

- **Lungu et al., 1997** ([16])

$$\ln P GA \left(\frac{cm}{s^2} \right) = 5.128 + 1.063 M_{MG} - 1.297 \ln R_h - 0.009h + 0.449P \quad (8)$$

- **Sokolov et al., 2008**, ([30])

$$PGA(sm/s^2) = \exp(-8.49907 + 7.73683 \ln \llbracket M_W \rrbracket) - \exp(-1.49548 - 0.72045h) R_e - 0.01825h \quad (9)$$

($M_w=5-8$, $h=70-160$ km., R_e up to 500km., for soil type - rock)

- **Vacareanu et. al., 2014-VEA14**, ([41])

$$\ln P GA \left(\frac{cm}{s^2} \right) = 8.5851 + 1.4863(M_W - 6) - 0.4758(M_W - 6)^2 - \ln R_e - 0.00138R_e + 0.00484h, \quad (10)$$

$$\sigma_T = 0.738,$$

(Distribution of data: $69 \leq h \leq 173$, $100km. \leq R_e \leq 200km.$; For use $R_e = (60 - 200)km.$)

Where,

- M_w is moment magnitude,
- M_{GR} - Gutenberg-Richter's magnitude,
- R_h - hypocentral distance in km,
- R_e - epicentral distance in km,
- h - focal depth in km, and
- P - variable with zero value and unity for median and median plus one standard deviation, respectively.

All compared GMM-s refer to an entire region, or to azimuths of 0° to 360° . The following moment - Gutenberg-Richter magnitude relationship has been used: $M_W = 1.09 M_{MG} - 0.36$ ([30]).

The comparison between the GMM-s developed through these investigations with the GMM-s - Lungu et al., 1997 [16], is given in Figure 9. It shows the $PGA^{expected}$, median (solid line) and median ± 1 standard deviation (broken line) for the INCERC location and an earthquake with an epicenter equal to the epicenter of the catastrophic earthquake of 4 March 1977, with magnitude $M=7.2$ and hypocenter $h=109$ km. Figure 9 presents that $PGA^{expected}$, computed with GMM SS20-SL, for azimuth INCERC, median ± 1 standard deviation, shows considerably lower values than those computed according to [16], for distances of up to about 150 km.

The comparison of the expected PGA, for soil type - rock, computed with the GMM-s developed in these investigations and the GMM developed by Sokolov et al. [30], is given in Figure 10. The GMM-s of Sokolov et al. [30], refer to 8 separate regions, while here, they have been applied for two regions, namely, "east" and "south-west" ([30]) for soil type - rock. For these GMM-s, no standard deviations have been defined, while a logarithmic value of 1.1 to 0.7 has been used as a measure for the data scatter, for the regions "east" ("East" - a circle symbol connected with a thick solid line) and "south-west" ("South-West", a circle symbol connected with a broken line), respectively ([30]). Bucharest location is in region no. 6 or "south-west". The comparison between median ± 1 standard deviation shows that SS-20-RL (triangle symbol connected with a solid line) and SS20-RA (rhombus symbol connected with a solid line) give higher values of PGA for the entire region "south-west", while for the region "east", for $R_e > 90$ km.

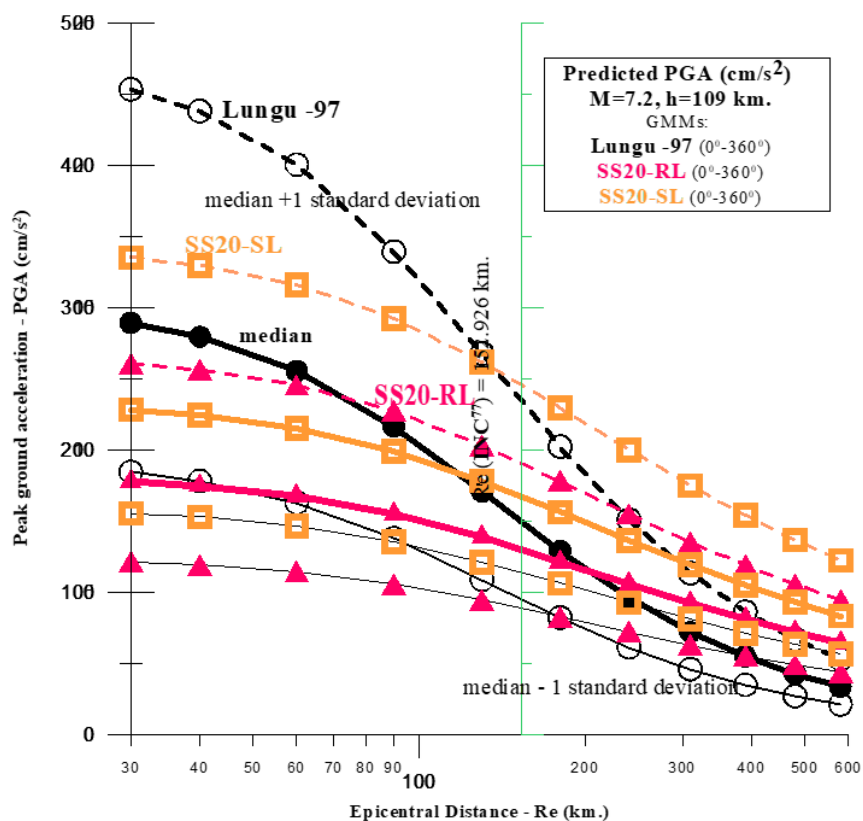


Fig. 9. $PGA^{expected}$ according to Lungu-97 and SS20

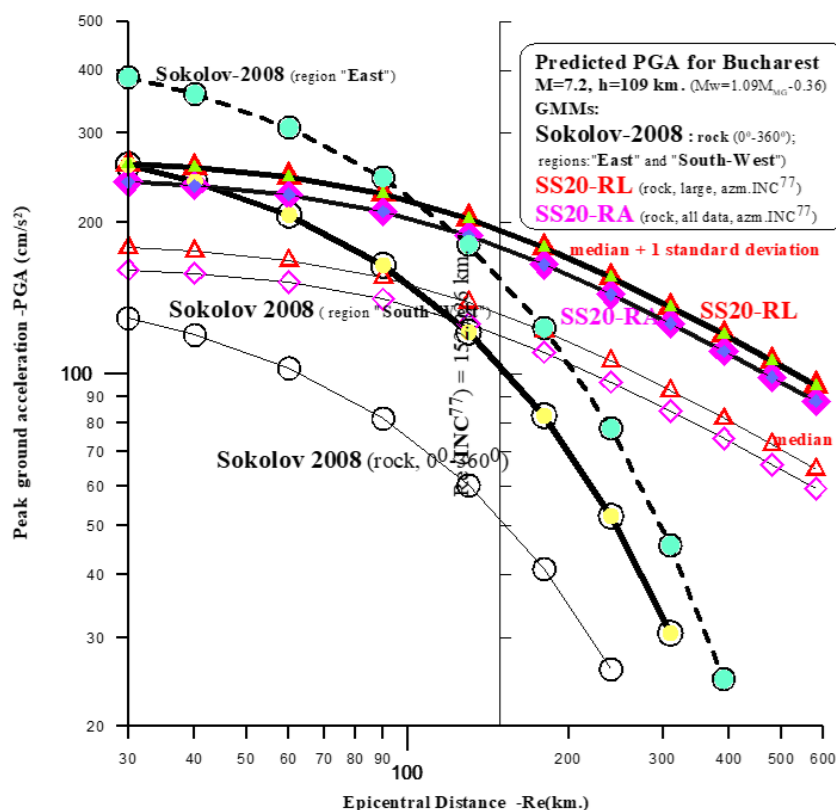


Fig. 10. $PGA^{expected}$ according to Sokolov and SS20

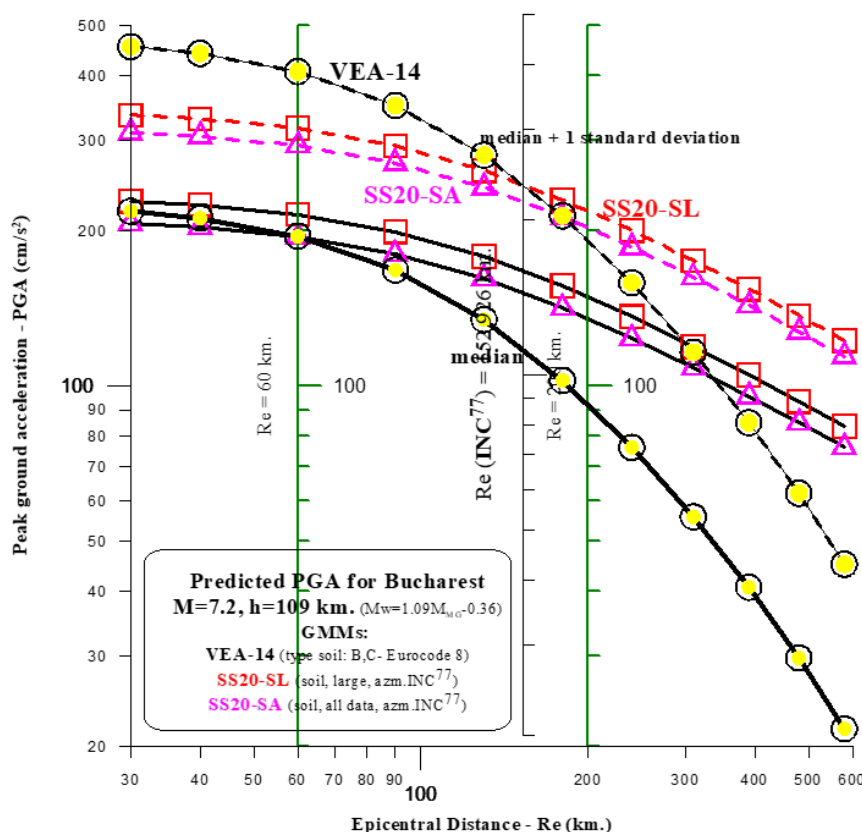


Fig. 11. Expected PGA according to GMM-VEA14 and SS20 (SL and SA)

The comparison with the GMM from the second group, Vacareanu et al., 2014 –VEA14 [41], and the developed ones in these investigations is given in Figure 11. For epicentral distances of up to about 180 km GMM SS20-SL (soils, the greater of the two horizontal components) as median + 1 standard deviation (broken line), it gives lower values of PGA, whereas for all remaining distances, it gives greater values of PGA. The expected PGA as median per VEA 14 are lower for all epicentral distances. This model refers to soil type B, C and D (without A) according to Eurocode 8, EN 1998-1, 2004 [9] and ([40], [41]). With special investigations ([18]) it has been evaluated and proposed for one of the four alternative GMM-s, defined in ([3]), and applicable for computation of the probabilistic hazard in Romania – PSHA: YEA97 ([42]), for soil type A- rock and for soil type B; AB03 ([1]); ZAT06 ([43]) and VEA14 ([41]).

This comparison shows that, when we use data on only one focus and the new philosophy of development of GMM-s ([38], [39]), we obtain higher values of median and very small standard deviations. This is considerably different from the philosophy of using mixed data and their analysis as independent of region, country, and use of data on a single occurred earthquake as independent among themselves. The result of application of such philosophy are lower values of median and very high values of standard deviation ([41]), which are the result of the large dispersion of the analyzed data around the expected mean values. They have a very strong effect upon the computed, practically applicable results, with the probabilistic and the deterministic hazard.

3.7 COMPARISON WITH GMM-S FROM OWN PREVIOUS INVESTIGATIONS

In addition to comparisons with other researchers, a comparison has been made (Figure 12) between the expected PGA computed with GMM SS20-RL and the models published in 2012 ([38], indicated by SS12-RL - instrument location) for the effect of an earthquake with magnitude 7.0 and focal depth of 131 km, as median + 1 standard deviation. The GMM-s from 2012 ([38]) have been computed with the greater of the two horizontal components, whereas the azimuth has been included indirectly.

The comparison (Figure 12) shows that the effect of the azimuth, magnitude and epicentral distance is better included in GMM defined according to instrument location. It also shows that, when a model for an entire region is used, underestimated and overestimated values of $PGA^{expected}$ are used.

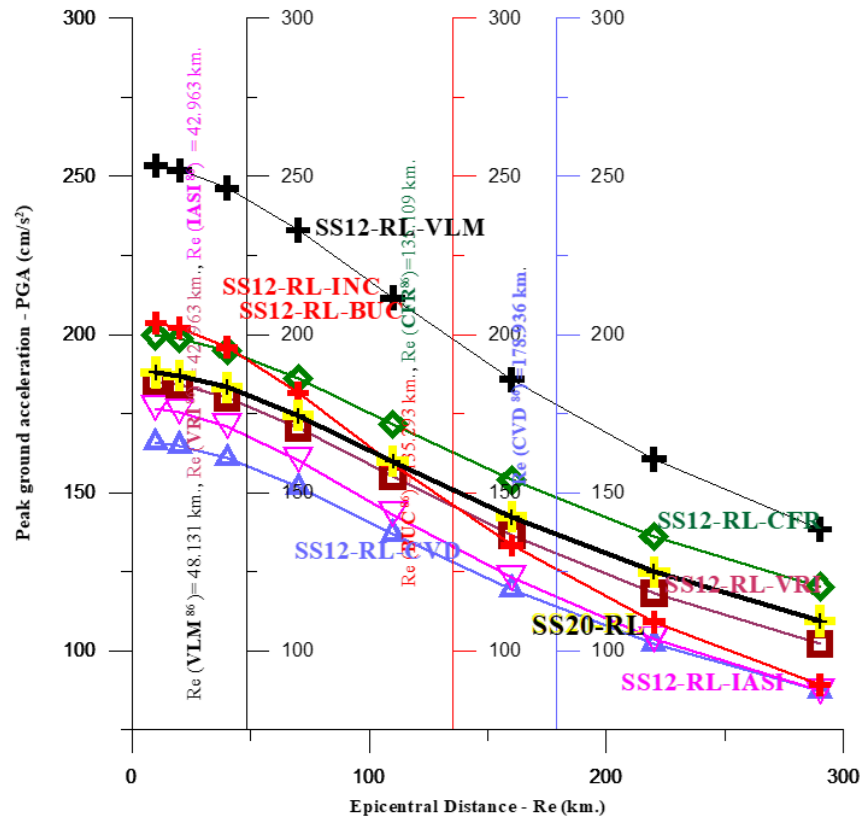


Fig. 12. Comparison of $PGA^{expected}$ (median + 1 standard deviation) computed with GMM SS20-RL and GMM-s for instrument locations (Stamatovska, 2012)

PROOF:

If we compute PGA with GMM for the entire region, it means that, for any azimuth between 0^0 and 360^0 , a PGA curve is obtained for median, median + 1 standard deviation and median -1 standard deviation, for an earthquake with magnitude - M and focal depth - h. A proof is given in Figure 13. It shows expected values of PGA for four different locations (symbols: FOC - yellow, BUC - black, CVD - red and VRI - blue). Despite that each of the expected PGA has been computed with the corresponding azimuth for each instrument location (equation 6), they depend only on the epicentral distance at which the location was in respect to the earthquake epicenter. This does not mean that the azimuth is not included, but that its effect is included in the regression coefficients and the standard deviation and is distributed over the entire region, or that the regression coefficients have identical value for any azimuth between 0^0 and 360^0 . This also confirms the accuracy of all mathematical operations applied in these investigations.

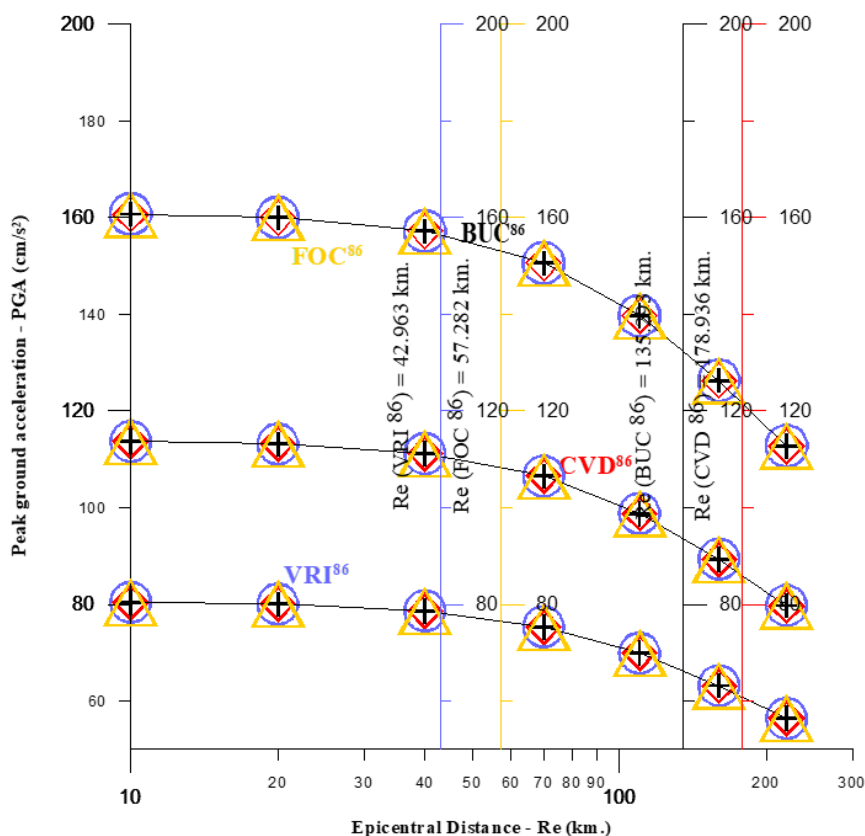


Fig. 13. Distribution of $PGA^{expected}$ (cm/s^2) for an earthquake with $M=7$. and $h=131km$ (GMM for the entire region, SS20-RL)

3.8 GMM-S FOR AZIMUTH ACCORDING TO INSTRUMENT LOCATION

GMM for instrument location can be computed only if the instrument location is permanent and if the instrument has recorded all occurred earthquakes. In the investigations that have been published by the author so far, GMM-s have been computed according to instrument locations ([31], [38]). Both include the azimuth in an indirect way.

Prior to development of GMM according to instrument location with directly included azimuth, it is necessary to respond to the following question:

- If we perform investigations with the same databank of records of occurred earthquakes and if we had previously developed GMM according to one instrument location with indirectly included azimuth, is it necessary that we develop GMM according to instrument location with directly included azimuth?

The answer is **no**.

PROOF:

We compute GMM with directly included azimuth for instrument locations: INCERC, VLM and CFR. The greater of the two horizontal components is used, or 95 data for VLM and CFR each and 97 for INCERC, all for soil type - rock. The computed regression coefficients and standard deviation are given in Table 2.

Table 2. Regression coefficients and standard deviations

$$\text{Mathematical model: } \ln P_{GA} = b + b_M M + b_R \ln \sqrt{(R_e \cos \beta)^2 (1 + t g^2 \beta)} + h^2 + P_{\sigma \ln P_{GA}}$$

Type of soil (number of data)	GMM-s	Regression coefficients			Standard deviation $\sigma P_{GA_{ln}}$
		b	b_M	b_R	
Rock (97)	SS20-RL-INC	-1.41100	1.49015	-0.84124	0.35861
Rock (95)	SS20-RL-VLM	-3.90509	1.76247	-0.67717	0.39395
Rock (95)	SS20-RL-CFR	0.94251	0.96256	-0.56948	0.38344

Also, comparison has been made between the expected PGA, median + 1 standard deviation, for three instrument locations (VLM, CFR and INCERC) by use of GMM-s developed with indirectly included azimuth ([38], models SS12-RL-INC, SS12-RL-CFR and SS12-RL-VLM) and the herein developed ones with directly included azimuth (Table 2, SS20-RL-INC, SS20-RL-CFR and SS20-RL-VLM). The comparison is graphically presented in Figure 14 and shows that the mathematical equations for GMM with indirectly and directly included azimuth give identical results. The minor differences are the result of different mathematical operations for indirectly and directly included azimuth ([38]). With this proof, it is confirmed and proved that, also in the case when the azimuth is indirectly included and is not visible in the mathematical equation, the regression coefficients and the standard deviation include its effect and one cannot think that, the azimuth is not included if it is not visible in the equation and that the model is not dependent on the azimuth.

The comparisons shown in Figure 14 are also a proof that, when the same databank is used, then both the indirect and direct way of including the azimuth give the same result. At the same time, the figure is a proof of the accuracy of the results obtained from these investigations and the investigations done in 2012 ([38]).

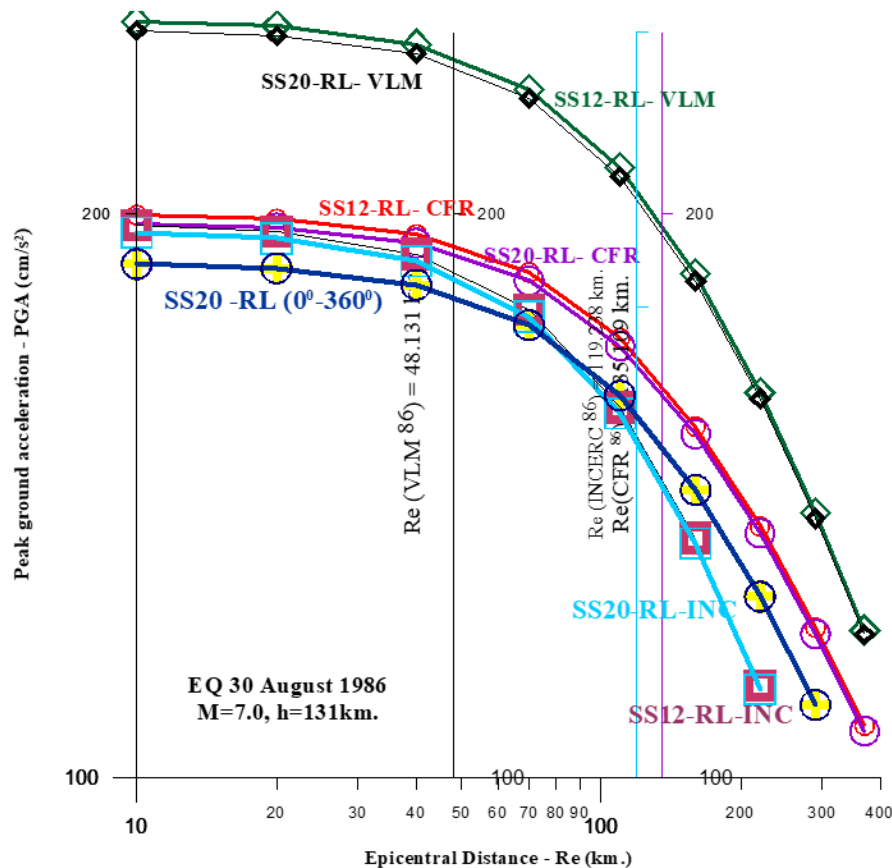


Fig. 14. Comparison of $PGA^{expected}$ computed with the GMM-s from the presented investigations (SS20) and GMM-s from the investigations done in 2012 (SS12) for instrument locations VLM, CFR and INC

Given herein is also a note about what computation of PGA with GMM according to instrument location means.

NOTE:

Computation of PGA with GMM for instrument location is quite different than computation with GMM for an entire region. An example is shown in Figure 15. Presented are the computed median (solid line) and median plus one standard deviation (broken line) for PGA with GMM-s for instrument locations VLM, VRI and CFR, as well as with the GMM for the entire region SS20-RL. Figure 15 shows that there are considerable differences between the computed values of PGA, whereat the effect of the azimuth is better included in the GMM for instrument location and provides more realistic values of PGA, compared with the computed ones with GMM for the entire region. More specifically, when GMM for an entire region is used, smaller values of PGA are obtained for locations VLM and CFR, while larger values are obtained for the location VRI, for an earthquake with $M=7.2$ and $h=109$ km (Figure 15).

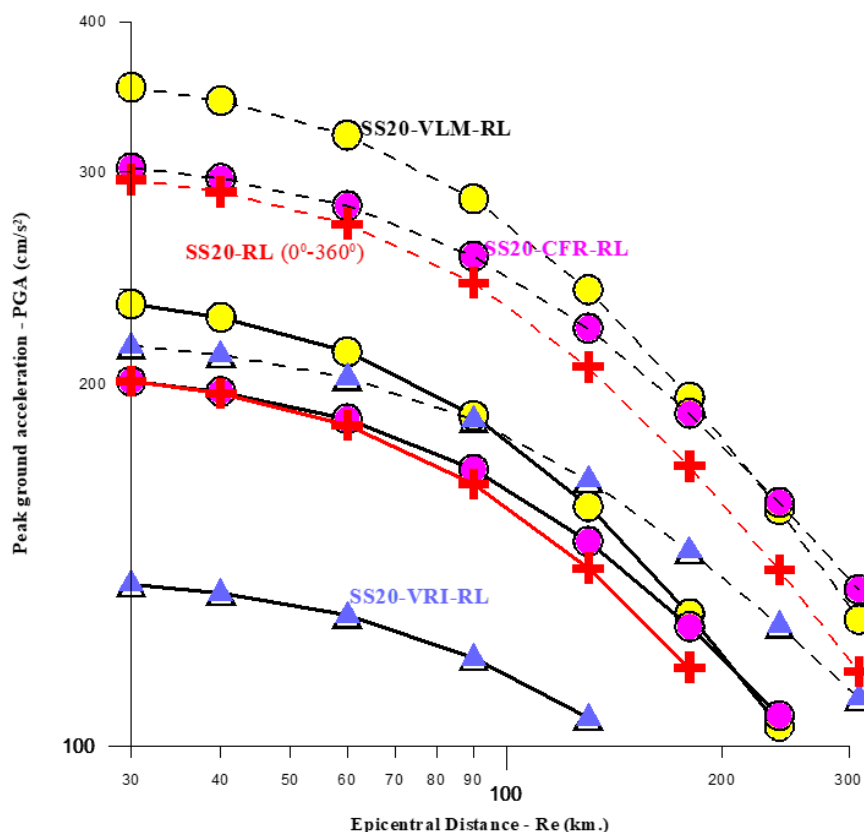


Fig. 15. Distrubution of $PGA^{expected}$ (cm/s^2) for an earthquake with $M=7.2$ and $h=109$ km, median (solid line) and median + 1 standard deviation (broken line).

We herewith note that the GMM for an instrument location does not refer to a single azimuth only, but to an azimuth segment defined by the least and the greatest value of the azimuth at which the instrument location is in respect to the epicenters of all occurred earthquakes recorded on it. The size of this azimuth segment for one location may be confirmed or changed with each new occurred earthquake. It is referred to as **characteristic/natural width of the azimuth segment**. Depending on the position of the location in respect to the earthquake epicenter, the characteristic width can be small, medium or large. For example, for the instrument locations INCERC, Bucharest, the least azimuth value is 192° , whereas the greatest is 200° (Figure 16), or the characteristic width of the azimuth segment is $\Delta\beta = 8^\circ$. For the instrument location VLM (Valeni) (Figure 16) $\Delta\beta = 3^\circ$ for the instrument location CVD (Cherna Voda) $\Delta\beta = 15^\circ$ (Figure 16, [31]).

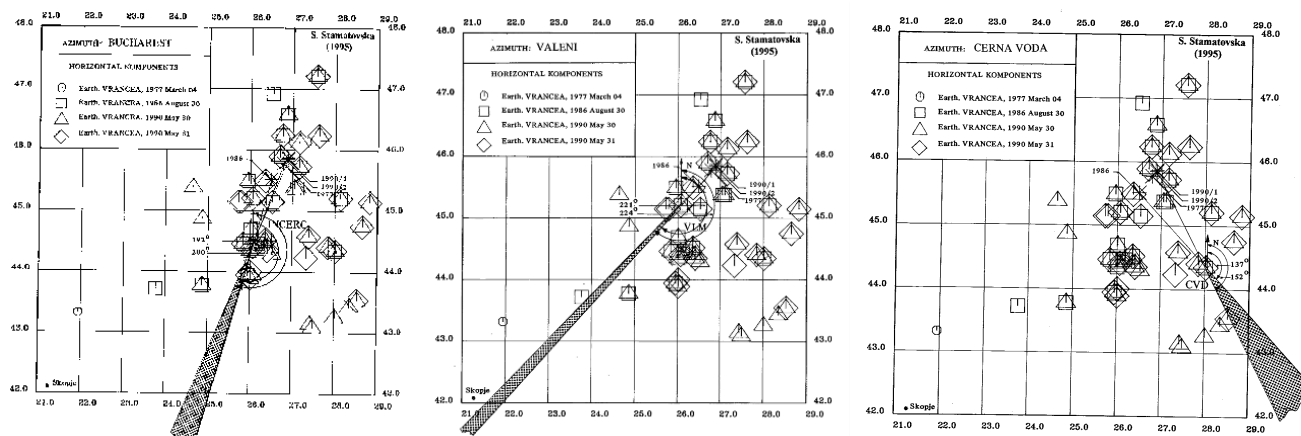


Fig. 16. Distribution of azimuths included in the GMM for instrument locations INCERC, VLM and CVD (Stamatovska, 1996)

Taken as a characteristic example herein is the instrument location VRI, which was between azimuth 279° and 22° , or characteristic azimuth segment width $\Delta\beta = 102^{\circ}$ ([31], [38]) during the occurred earthquakes. Computed for this instrument location was PGA, median (solid line) and median +1 standard deviation (broken line) for the earthquakes that occurred in 1986 and both earthquakes that occurred in 1990 (Figure 17).

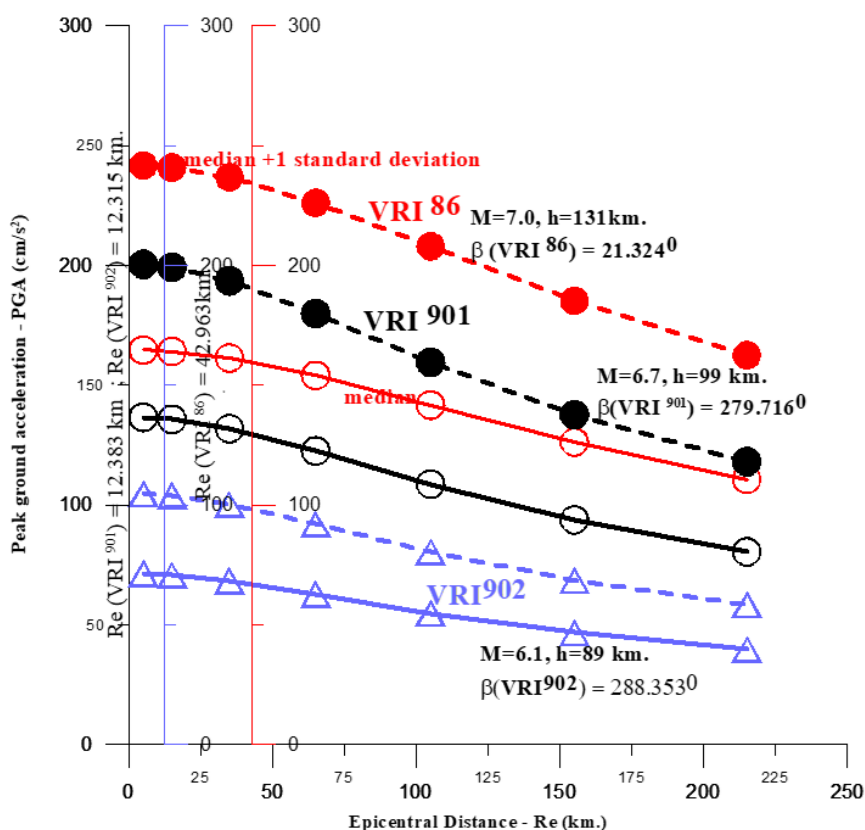


Fig. 17. Distribution of $\text{PGA}^{\text{expected}} (\text{cm/s}^2)$ for VRI location

Figure 17 shows that location VRI, which is in the epicentral zone was at quite different azimuths and epicentral distances depending on the earthquake epicenter, wherefore we have different values of the expected PGA from each occurred earthquake.

All the above stated shows the importance of computation of GMM for instrument location and through it, arriving at the need to develop GMM-s for an azimuth segment with **selected width** - $\Delta\beta$. What will be the width of the azimuth segment

$\Delta\beta$ and how it will be defined depends on whether the instrument network of a country or an entire region is uniformly or non-uniformly distributed, the number of distributed records of occurred earthquakes per azimuth segments and the objectives of the investigation.

If GMM is developed for an azimuth according to location of an instrument, which has not recorded all the occurred earthquakes, one can use a selected width of an azimuth segment obtained by variation of its least or the greatest azimuth, or of both azimuths by which the characteristic width of the azimuth segment is defined according to that instrument location. Such defined azimuth segment may also include in itself azimuths from other locations at which strong earthquakes from that focus were recorded.

If GMM-s are developed for preparation of ground motion maps for a country or region, then the region is divided into azimuth segments with different width- $\Delta\beta$. The tendency should be toward as little as possible selected azimuth width, whereas the division of the region may start from any azimuth. For this, a computer program could be elaborated and computer processing could be used.

The results from the investigations of GMM-s for azimuth segments with different selected width and use of the same databank in the presented investigations will be published separately. These and the results presented herein are a constituent part of the monograph entitled "New Model of Ground Motion with Directly Included Azimuth" written in the mother tongue (Macedonian) of the author.

4 CONCLUSIONS

Based on the investigations presented herein, the author has drawn the following conclusions:

1. Developed and verified is a new mathematical equation for an empirical model of ground motion based on radius vectors, with directly included azimuth.
2. The mathematical equation has been developed based on data for regression analysis obtained by use of a developed general method/their generator.
3. The method uses the recorded seismic field from earthquakes that occurred at a single seismic focus and all its normalized seismic fields according to each instrument location at which it was recorded.
4. With it, each earthquake is analyzed as a single random natural phenomenon that is strictly regionally/geographically dependent, whereas the regional records obtained from it are analyzed as dependent on each other and in relation with each other.
5. The mathematical equation is applicable for investigation of all ground motion parameters (peak ground acceleration/or peak velocity/ or peak displacement and Fourier amplitude spectra), as well as all parameters of linear and nonlinear dynamic response of a model of a single-degree-of-freedom system.
6. It can be equally used for investigation of shallow, deep and subduction earthquake foci.
7. Its application is not limited to epicentral distance at which the records of occurred earthquakes are obtained. It is applicable for all distances computed by the method of generation of data for regression analysis.
8. Practically, it is applicable in all deterministic and probabilistic methods that have been developed so far for prediction of expected seismic effect, from location to region.

REFERENCES

- [1] Atkinson, G., Boore D. (2003) «Empirical ground motion relations for subduction-zone earthquakes and their application to Cascadia and others regions», *BSSA* 93 (4): 1703-1729.
- [2] Boore D.M., Joyner W.B. (1981) «The Empirical Prediction of Ground Motion». *Bulletin of Seismological Society of America*, 72, S43-S60.
- [3] Delavaud, E., Cotton F., Akkar S., Scherbaum F., Danciu L., Beauval S., Douglas J., Basili R., Sandikkaya A., Seogou M., Faccioli E., Theodulidis N. (2012). «Toward a ground – motion logic three for probabilistic seismic hazard assessment in Europe», *Journal of Seismology* 16 (3): 451-473.
- [4] Demetriu S., Vacareanu R., Lungu D., Pavel F., Arion C., Ianovici M., Aldea A., Neagu C. (2014) «Ground motion prediction equations for Vrancea intermediate-depth earthquakes». *Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN 2014*, Porto, Portugal, 30 June – 2 July 2014.

- [5] Douglas et al. (2011) «Ground Motion Prediction Equations 1964-2010 (and its upgrading up to 2018)», PEER report 2011/102 Pacific Earthquake Engineering Research Center, Collage of Engineering, Berkeley, California.
- [6] Douglas John (2019) «Ground Motion Prediction Equations (1964-2019)», Department of Civil and Environmental Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, UK.
- [7] Drumya and Shebalin (1985, Kishinev), The book: Earthquake, When, Where, Way?.
- [8] Laszlo Gyongyosi, Sandor Imre (2019) «A Poisson Model for Entanglement Optimization in the Quantum Internet». *Springer 2019. Quantum Information Processing (2019)* 18: 333. [Online] Available: <http://doi.org/10.10070s11128-019-2335-1>.
- [9] EUROCODE 8: Design provisions for Earthquake Resistance of Structures, (2004) EN 1998-1: 2004, Stage 51, 2004.
- [10] Joyner W.B., Boore, D.M. (1981) «Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong-Motion Records Including Records from the 1979 Imperial Valley, California Earthquake», *BSSA* 71, No.6, pp.2011-2039.
- [11] Jurukovski D., Mamucevski D., Stamatovska S., Taskov Lj., Petrovski D. (1995) «Seismic Functional Qualification of Active Mechanical and Electrical Components Based on Shaking Table Test- Shaking Table Test of the NPP Kozloduy YKTC Control Panel», Report IZIIS 95-52, Skopje, R. of Macedonia, 1995.
- [12] Jurukovski D., Mamucevski D., Stamatovska S., Petrovski D. (1997) «Seismic Functional Qualification of Active Mechanical and Electrical Components Based on Shaking Table Test- Seismic Testing of Relays Used on NPP Kozloduy, Unit 5», Report IZIIS 97-34, Skopje, R. of Macedonia, September 1997.
- [13] Jurukovski D., Mamucevski D., Stamatovska S., Petrovski D. (1997) «Seismic Functional Qualification of Active Mechanical and Electrical Components Based on Shaking Table Test- Seismic Testing of Relays Used on NPP Kozloduy, Unit 5», Report IZIIS 97-34/1, Skopje, R. of Macedonia, December 1997.
- [14] Jurukovski D., Mamucevski D., Stamatovska S. (1997) «Seismic Functional Qualification of Active Mechanical and Electrical Components Based on Shaking Table Test- Seismic Testing of Relays on NPP Kozloduy, Unit 5», IAEA Coordination Meeting, San Francisco, October 1997.
- [15] Lungu, D., Comman, O. (1995) «Experience Database of Romanian Facilities Subjected to the Last Three Vrancea Earthquake. Part I, Probabilistic Hazard Analysis of the Vrancea Earthquake in Romania, Contract No. 8223/EN, *Prepared for IAEA*, Vienna, Austria.
- [16] Lungu D, Zacienco A., Cornea T., Van Gelder P. (1997) «Seismic hazard: recurrence and attenuation of subcrustal (60-170km.) earthquakes: *Struct Saf* 7: 1525-1532.
- [17] Moskalenko, T.P. (1980) «Isoseismal Maps of Carpathian Earthquakes (in Russian)», Carpathian Earthquake of March 4, 1977 and its Consequences, 86-105, Science, Moscow.
- [18] Pavel F., Vacareanu R., Aldea A. (2014) «Evaluation of GMPES for Vrancea intermediate-depth seismic sources», *Proceedings of Second European Conference on Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, Istanbul, August 25-29, 2014.
- [19] Petrovski D., Stamatovska S., Arsovski M., Hadzievski D., Sokerova D., Vaptzarov I., Solakov D., Satchanski S. (1993) «Seismic Hazard Analysis of NPP Kozloduy Site», *12th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 12)*, August 15-20, 1993, Stuttgart, Germany.
- [20] Petrovski D., Stamatovska S., Arsovski M., Hadzievski D., Andrieu R. (1995) Seismic Hazard Analysis of Low Seismicity NPP Sites. *13th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT13)*, August 13-18, Porto Alegre.
- [21] Petrovski D., Stamatovska S., Arsovski M., Hadzievski D., Talaganov K., Gadza V., Zafirova I., Paskalov A. (1995). «Updating of Seismic Input Data for Cherna Voda NPP Site», Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, University «Ss. Cyril and Methodius», Skopje, Republic of Macedonia, Report IZIIS 95-22, 1995.
- [22] Petrovski D., Stamatovska S., Talaganov K., Paskalov A., Hadzievski D., Arsovski M. (2003) «Probabilistic Seismic Hazard Analysis for NPP in Eastern Europe», *International Conference in Earthquake Engineering to Mark 40 Years from Catastrophic 1963 Skopje Earthquake and Successful City Reconstruction*. Skopje-Ohrid, R. of Macedonia, 26-29 August 2003.
- [23] Popescu E., Boreleanu F., Plancita A.O., Neagoe C., Radulian M. (2010) «Scaling parameters of the Vrancea (Romania) seismic sources at intermediate depth», *Romanian Geophysical Journal*, Volume 54, pp. 3-17.
- [24] Popescu E., Radulian M., Balea A., Toma-Darila D. (2018) «Earthquake mechanism in Vrancea subcrustal source and in the adjacent crustal seismogen areas of the South-Estern Romania», *Romanian Reports in Physics*, April, 2018.
- [25] Radu C. (1991) «Strong earthquakes occurred on the territory in the period 1901-1990 (in Romanian) ». *Vitalii* 3: 12-13.
- [26] Radu, C. (1994) «Uniform hazard response spectra for Vrancea earthquakes in Romania», *Proc. of 10th ECEE*. Vienna, Aug. 28-Sept. 2, 1994.
- [27] Radu C., Lungu D., Demitriu S., Comman O. (1994) «Recurrence, attenuation and dynamic amplification for intermediate depth Vrancea earthquakes», *In Proceedings XXIV ESC General Assembly*, Vol. 3, Athens, Greece, 1736-1745.

- [28] Scherbaum F, Cooton F, Smith P (2004) «On the use of response spectral- reference data for the selection and ranking of ground-motion models for seismic –hazard analysis in regions of moderate seismicity: the case of rock motion», *Bulletin of the Seismological Society of America* 94 (6): 2164-2185.
- [29] Scherbaum F, Delavaud E, Riggelsen E (2009) «Model selection in seismic hazard analysis: an information theoretic perspective», *Bulletin of the Seismological Society of America* 99 (6): 3234-3247.
- [30] Sokolov V., Bonjer K.P., Wenzel F., Grecu B., Radulian M. (2008) «Ground–motion prediction equations for the intermediate depth Vrancea (Romania) earthquakes», *Bull. Earthq. Eng.* 6 (3): 367-388, 2008.
- [31] Stamatovska, S. (1996) Empirical Non-homogeneous Attenuation Acceleration Laws for Vrancea Intermediate Earthquakes, *Ph.D. thesis (in Macedonian)*, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, University «Ss. Cyril and Methodius», Skopje, Republic of Macedonia.
- [32] Stamatovska, S.G., Petrovski, D.S. (1996) «Empirical Attenuation Laws for Vrancea Intermediate Earthquakes», *11th World Conference of Earthquake Engineering (11WCEE)*. Paper No. 14. Mexico, Acapulco, 1996.
- [33] Stamatovska S., Petrovski D. (1997) «Non-Homogeneous Attenuation Acceleration Laws for Vrancea Intermediate Earthquakes», *14th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT14)*, August 17-22, Lyon, France, 1997. Reference: K02/4, pp. 77-82.
- [34] Stamatovska S. (2002) «A New Azimuth Dependent Empirical Strong Motion Model for Vrancea Subduction Zone», *12th European Conference of Earthquake Engineering (12ECEE)*, London, 9-13 September, 2002, Paper Reference 324.
- [35] Stamatovska, S.G. (2006) «A New Ground Motion Model – Methodological Approach». *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica (AGGH)*, Vol. 41 (3-4), pp.409-423. DOI: 10.1556/AGeod.41.2006.3-4.12.
- [36] Stamatovska, S.G. (2008) «Ground Motion Models-State of the Art». *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica (AGGH)*, Vol. 43 (2-3), pp. 267-284. DOI: 10.1556/AGeod.43.2008.2-3.14. 33.
- [37] Stamatovska Gjorgji Snezana (2009) «A Method for Analysis and Evaluation of Ground Motion Models», Harmonization of Seismic Hazard Maps for West Balkan Countries –BSHAP, NATO-Project SFP 983054. (2008-2011), Banja Luka, 2009.
- [38] Stamatovska, S.G. (2012) *The Latest Mathematical Models of Earthquake Ground Motion in Seismic Waves, Research and Analysis*, In: INTECH Open Access Publisher, Rijeka, 2012, pp.113-132, DOI: 10.5772/28078. Ed. Masaki Kanao (ISBN 978-953-307-944-8.), [Online] Available: <http://www.intechopen.com/articles/show/title/the-latest-mathematical-models-of-earthquake-ground-motion>.
- [39] Stamatovska Gjorgji Snezhana (2022) «From seismic imagination to azimuth dependent ground motion models», *17th European Conference of Earthquake Engineering (17ECEE)*, Bucharest, 4-9 September 2022.
- [40] Trendafilovski, G., Ways M., Rosset P., Marmureanu G. (2009) «Constructing City Models to Estimate Losses due to Earthquake Worldwide: Application to Bucharest, Romania». *Earthquake Spectra* 25 (3): 665-685.
- [41] Vacareanu, R., Pavel F., Aldea A. (2013) «On the Selection of GMMs for Vrancea Subcrustal Seismic Sources». *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 6, Issue 6, pp. 1867-1884. DOI: 10.1007/s10518-013-9515-7.
- [42] Youngs, R.R., Chiou S.J., Silva W.J., Humphrey J.R. (1997) «Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes», *Seismological Research Letters* 68 (1): 58-73.
- [43] Zhao, J., Zhang J., Asano A., Ohno Y., Oouchi T., Takahashi T., Ogawa H., Irikura H., Thio H., Somerville P., Fukushima Y. (2006) «Attenuation Relations of Strong Motion in Japan using classification based on predominant period», *BSSA* 96 (3): 898-913.

ENCLOSURE A:

A.1 GENERAL METHOD – GENERATOR OF DATA FOR REGRESSION ANALYSIS

An original general method - generator of data for performance of regression analysis has been developed. It uses recorded seismic field and its normalized seismic fields for each occurred earthquake, taken separately. With the normalized seismic fields, corrected epicentral distances are computed for all instrument locations at which that earthquake has been recorded.

The method enables definition of data for regression analysis for azimuth dependent GMM with **indirectly** ([31], [38]) and **directly** included azimuth, as a parameter affecting the amplitude and frequency content of ground motion. Here, one should also use the corresponding equation for computation of the term dependent on distance. For example, when the azimuth is directly included and is visible in the equation, equation 5 or 6 is used.

A.2 DESCRIPTION OF THE METHOD

Let us consider a general case of distribution of records in an azimuth segment (Figure A-1). In these investigations, the term azimuth segment means part of the region lying between two azimuths, initial and end azimuth.

Let instrument locations L_1 to L_4 be distributed over it. We assume that records of 4 occurred earthquakes are obtained as follows: at location L_1 - from earthquake EQ^1 and EQ^2 ; at location L_2 - from occurred earthquakes EQ^1 , EQ^2 and EQ^3 ; at location L_3 - only from EQ^2 and at location L_4 - from EQ^4 . Let the total number of records obtained over the entire region, per the order of occurrence of earthquakes is, for example, 5, 20, 33 and 1. The recorded value of the ground motion parameter, for example, the absolute value of PGA, from the earthquake EQ^1 obtained at location L_1 , is indicated by ρ_1^1 , while that at location 2, is indicated by ρ_1^2 (Note: In the ρ_1^2 sub-script, 1 refers to location L_1 , whereas superscript 2 refers to earthquake EQ^2 . The value of $\rho_1^2 = |PGA|_1^2$).

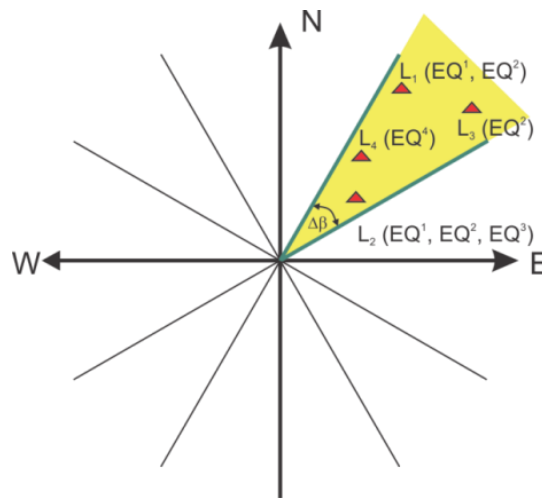


Figure A-1. Azimuth segment

We compute data for regression analysis, namely, we perform correction of epicentral distances by application of normalized seismic field as follows:

- 1) We define normalized seismic field for location L_1 due to earthquake EQ^1 ($(\rho_1^1)/(\rho_i^1), i = 1, 5$). With it, we correct the epicentral distances for all records of earthquake EQ^1 [$((R_e^c)_i^1 = (\rho_1^1)/(\rho_i^1)(R_e)_i^1, i = 1, 5)$], and we enter them in the data for regression analysis. Thus, we obtain 5 data with corrected epicentral distances.
- 2) With the normalized seismic field for location L_1 , for earthquake EQ^2 , we compute corrected epicentral distances for all 20 records of earthquake EQ^2 [$((R_e^c)_i^2 = (\rho_1^2)/(\rho_i^2)(R_e)_i^2, i = 1, 20)$] and we enter them in the data for regression analysis.
- 3) We define the normalized seismic field for location L_2 , separately for each occurred earthquake EQ^1 , EQ^2 and EQ^3 . We compute corrected epicentral distances, separately for each occurred earthquake, and in the data for regression analysis, we include $5 + 20 + 33$, or a total of 58 data.

- 4) We define normalized seismic field for location L_3 , for the effect of earthquake EQ^2 . We compute corrected epicentral distances for all records of this earthquake or 20, and we include them in the data for regression analysis.
- 5) The record obtained at location L_4 due to earthquake EQ^4 , being only one, is included as normalized by itself, and as a single datum, it is added to the remaining data for regression analysis.

According to the above stated, although we have only 7 records of occurred earthquakes in the azimuth segment (2 at location 1, 3 at location 2, 1 at location 3 and 1 at location 4), by use and analysis of the earthquake as an inseparable entirety and with the presented method herein, we obtain 104 data for regression analysis ($5+20+58+20+1=104$).

Over the created set of 104 data, we carry out a multi-linear regression analysis and compute regression coefficients b , b_M and b_R and standard deviation- $\sigma_{\ln PGA}$. Thus, we compute GMM for the selected azimuth segment.

In practical application of this method, there are two boundary cases. The first is when the initial and the end azimuth define an azimuth according to instrument location or an azimuth segment with a natural width, while the latter is when the initial azimuth is 0° and the end one is 360° / or the entire region is defined. For any other case, it is necessary to define initial and end azimuth by which an azimuth segment of a selected width is defined. The selection of the initial and the end azimuth may be based on the needs and the objectives of the research as well as on the distribution of the azimuths from the occurred earthquakes according to an investigated location or region. Each of these cases is investigated separately.

A.3 IMPORTANCE OF THE METHOD

The application of this original method enables avoiding the including of each record of an occurred earthquake obtained by a single instrument in the investigations as a datum that is independent of the remaining records obtained from that earthquake. In fact, each record of an occurred earthquake is much needed and is very important, but not sufficient enough. If it is not connected with all the other records obtained from that earthquake, it cannot thoroughly describe by itself only the characteristics of the occurred earthquake as are: the focal mechanism, the direction of the fault structure, the effect of the hypocenter, the effect of the volume affected by seismic waves and the effects of the regional characteristics at different azimuths. It is only through analysis of the earthquake as an event that is strictly regionally/geographically dependent, and including all its records with their spatial distribution taken as dependent on each other and in relation with each other, that one can include, in the simplest way, all the stated characteristics of an occurred earthquake in the ground motion model.

A.4 ASSOCIATION CONNECTED WITH THIS METHOD

This method is associated with mutual communication of obtained records from an occurred earthquake and exchange of their information by which the following is included in the investigation: the focal mechanism, the direction of the fault structure, the effect of the hypocenter, the effect of the volume affected by seismic waves and the effect of the characteristics of the region from the greatest depths of the seismic focus up to the earth's surface in different azimuth directions. It therefore opens a new way and a new philosophy in development of empirical mathematical-physical models of ground motion and their practical application.

A.5 PRACTICAL APPLICATION

As a method, it does not have any limitations in practical application. It can be used to develop GMM-s for earthquakes from shallow, deep and subduction foci as well as for all parameters of ground motion, parameters of elastic and inelastic dynamic response of a model of a single-degree-of-freedom system and Fourier amplitude spectra.

With the computed data for regression analysis, a support is given to development and use of GMM-s for epicentral distances greater than the epicentral distances at which an earthquake is recorded, or for all distances by which is defined the earth's volume affected by the seismic waves from the occurred earthquakes at that specific focus.

In addition, the method can also be used in other scientific investigations. It is referenced in the investigations of Gyongyosi&Imre, 2019 ([8]).

Design and implementation of a notification and geo-localisation system for the mobility of students and staff at Kimpa Vita-Uíge University

Kundakama Mpanda¹, Belarmino Garcia António², Bilolo António Vemba³, Nzakiese Mbongo⁴, Mavambu Diankatu⁵, Bazangika Mfumuanene Victoire⁶, and Nsuadi Kiese Glodi⁷

¹Department of Computer Engineering, Polytechnic Institute of the Kimpa Vita University, Angola

²Department of Computer Engineering, Polytechnic Institute of the Kimpa Vita University, Angola

³Department of Computer Engineering, Polytechnic Institute of the Kimpa Vita University, Angola

⁴Department of Computer Engineering, University of the Luanda, Angola

⁵Department of Computer Engineering, Polytechnic Institute of the Kimpa Vita University, Angola

⁶Department of Electrotechnical, Institute of Applied Techniques in Gombe Matadi, RD Congo

⁷Department of Mathematics -Informatics, Pedagogical Institute of Mbanza-Ngungu, RD Congo

Copyright © 2024 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the ***Creative Commons Attribution License***, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The objective of this work was to analyse the importance of the feasibility of using a geolocation alert system. With the evolution of technology and its growing importance in people's lives, existing vehicle tracking systems work with the aim of providing vehicle monitoring along a route. To meet the needs presented by the students, an electronic system was developed that will be installed on the bus, which will have the ability to send its geographical coordinates, based on a GPS system, to the GÊNESIS App and store them, thus enabling enrolled students and staff at Kimpa Vita University to locate a particular bus. The system presented in this research is designed to be a simple and easy-to-use tool, with a sufficient degree of precision to ensure that the results meet the specifications of the requirements.

KEYWORDS: smartphones, Arduino, RUP method, global positioning system.

1 INTRODUCTION

In recent decades, there have been major technological advances in the areas of computing and automation. With their diverse functionalities when networked, these technologies have created more and more integration in everyday activities, arousing the desire to use these resources as a way of simplifying operations and enabling autonomous and totally remote control [27].

With technology following a path in which systems are increasingly automatic and independent, it is necessary to utilise these technologies in functions that are considered simple, but which can have a significant impact on everyday activities.

Localisation systems are an example of technologies that have aroused great interest in both the academic and industrial fields. They have various applications, such as locating vehicles, fleets and people, and use self-localisation resources such as GPS [23].

As far as the geolocation system proposed in this research is concerned, it is intended for use in an automotive workshop, more precisely in locating vehicles. This location will be stored in a database, which will allow students to know the location of the buses.

Therefore, the creation of a geolocation alert system aims to provide students and staff with information on the positioning of buses moving along the UNIKIVI Campus - City Centre route on working days via SMS.

This solution will significantly improve the efficiency of the transport service provided by Kimpa Vita University (UNIKIVI) in Uíge. We hope that it will also be a mechanism to help drivers fulfil their routes and reduce student stress.

In addition, the geolocation alert system can also provide valuable data for the University's transport management, allowing it to monitor the most used routes and make more assertive decisions regarding route planning and resource allocation. With this, we believe that the implementation of this system could result in a more comfortable and efficient transport experience for the entire UNIKIVI academic community.

2 LITERATURE REVIEW

2.1 BRIEF HISTORY

Kimpa Vita University, abbreviated UNIKIVI, is a public institution with legal personality and classified as a public establishment. Its mission is to train higher education professionals in various areas of knowledge, as well as to carry out research and provide services to the community. UNIKIVI enjoys scientific, pedagogical, cultural, administrative, property and financial autonomy, as provided for by law.

The provincial government of Uíge has made an area of 1,500 hectares available to UNIKIV, located between the village of Condo Benza and Casseche, in the municipality of Uíge. However, this location is in a suburban area 7 km from the city centre of Uíge and is being built in phases.

As far as the transport system for students and staff is concerned, UNIKIVI has no system for alerting and geolocating buses to help students, thus causing students to be unaware of how the buses work and where they are. As a result, they spend a lot of time at bus stops in the sun and sometimes getting wet in the rain.

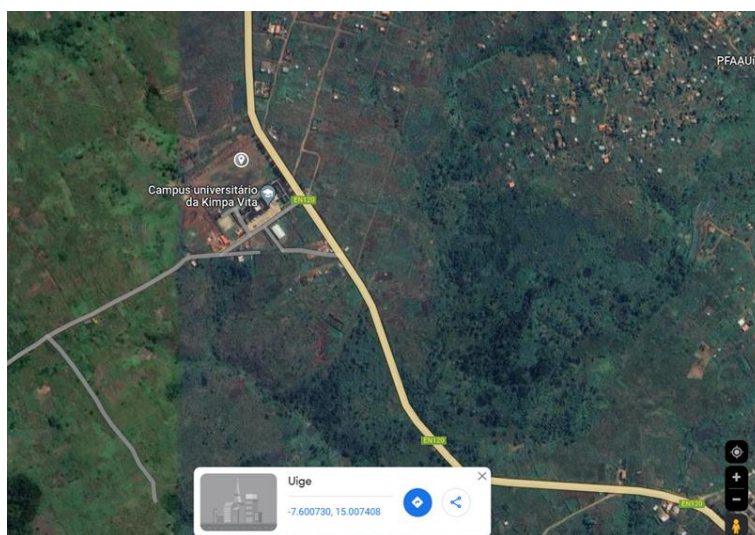


Fig. 1. Location of the Kimpa Vita university campus

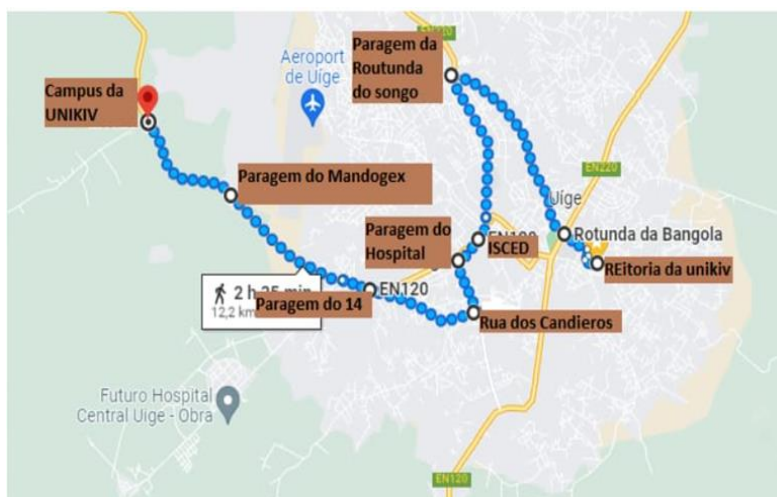


Fig. 2. Bus routes of Kimpa Vita University - Uíge City

UNIKIVI's rectory is located in the Popular neighbourhood, at Rua Henriques Freitas nº 1, in the same city. Due to the remoteness of the campus, the academic community faces considerable challenges related to the public transport that serves this area, specifically with regard to the buses provided by the rectory to cover these routes.

3 METHODS AND TOOLS

3.1 SYSTEM DEVELOPMENT

The RUP (Rational Unified Process) is a software development process that provides a set of guidelines and best practices for creating software systems. It was initially developed by the Rational Software Corporation (now part of IBM) in the 1990s and is based on software engineering principles.

The main objective of RUP is to meet the needs of users by guaranteeing high-quality software production that fulfils a predictable schedule and budget. Thus, RUP shows how the system will be built in the implementation phase, generating the project model and, optionally, the analysis model which is used to guarantee robustness.

The RUP perfectly defines who is responsible for each area, how the different phases should be done and when they should be carried out, describing all the development goals specifically so that they can be achieved.

The process is made up of four phases: conception, elaboration, construction and transition and each is related to a progress [14].

3.2 Tools

- The modelling language used is:
 - The UML
- Diagram construction is
 - Astah Community
- The main functions of the app genesis system:
 - Logging in
 - Registering a stop
 - Register students
 - Register Driver
 - Register Buses
 - List Students

- List Stops
- List Drivers
- List Buses
- Consult Students
- Consult Stops
- Consult Drivers;
- Consult Buses;
- Update (Driver, Student, Buses, Stops);
- Delete (Driver, Student, Buses, Stops);
- Locate Bus
- The programming language used to run the system is:
- JAVA programming language and INVETOR app
- Interfaces are programmed in
- JAVA Programming Language
- The database is located in
- MySQL database management system
- The materials that will be used to build the app genesis system are:
- Arduino board
- SIM808 GPS module,
- GSM/GPRS module
- Bluetooth module

3.3 DESIGN PHASE

In the initial system design, a discussion is held about the problem, defining the scope of the project, estimating the resources needed to carry out the project, among other things. It is during this phase that the project plan, initial use case and project glossary, among others, are presented [26].

3.4 ESTIMATED PROJECT TIME

Table 1. Below shows the data needed to calculate the average project execution time

Id	Activity	Duration of the activity (in days)		
		Expected time	Minimum time	Maximum time
(1)	Conception	20	10	40
(2)	Elaboration	15	20	30
(3)	Construction	50	30	60
(4)	Transition	15	10	30
Total		100	70	160

The average project execution time is determined using the following formula:

$$d(i) \simeq (\text{Expected time} + \text{Maximum time} + 4 * \text{Minimum time}) / 6$$

Substituting the values, we get:

$$d(1) \simeq (20 + 40 + 4 * 10) / 6 = 100 / 6 \simeq 17$$

$$d(2) \simeq (15 + 30 + 4 * 20) / 6 = 125 / 6 \simeq 21$$

$$d(3) \simeq (50 + 60 + 4 * 30) / 6 = 230 / 6 \simeq 38$$

$$d(4) \simeq (15 + 30 + 4 * 10) / 6 = 85 / 6 \simeq 14$$

So let's calculate the total duration of the project using the formula:

$$DT = \sum \text{Average times} = 17 + 21 + 38 + 14 = 90$$

The project will therefore last 90 days, corresponding to 2 months and 28 days.

3.5 SYSTEM ANALYSIS AND SPECIFICATION

The crucial phase of the project is analysing requirements and documenting the system, as this is where the specification and essential elements of the project are presented. In the context of developing the "App GÊNESIS" application, various requirements were identified. Initially, the functional requirements that were indispensable for designing the proposed solution were identified.

3.6 FUNCTIONAL REQUIREMENTS

Functional requirements describe what the system should do, they refer to the system's functionalities. The main functionalities are:

Table 2. Functional Requirements

Nº	References	Description
1	RF01	Login
2	RF02	Register Stop
3	RF03	Register Students
4	RF05	Register Driver
5	RF05	Register Buses
6	RF06	List Students
7	RF07	List Stops
8	RF08	List Drivers
9	RF09	List Buses
10	RF10	Consult Students
11	RF11	Consult Stops
12	RF12	Consult Drivers;
13	RF13	Consult Buses;
14	RF14	Update (Driver, Student, Buses, Stops);
15	RF15	Delete (Driver, Student, Buses, Stops);
16	RF16	Locate Bus

3.7 NON-FUNCTIONAL REQUIREMENTS

Non-functional requirements include performance requirements and other product quality attributes.

Table 3. Non-functional requirements

Nº	References	Description
1	RNF01	Computer with Windows 8,10 operating system Hardware Features: RAM 4GB or higher, Processor: Intel (R) Core (TM) i3-3110M CPU, 2.40GHZ or higher, HD 500GB
2	RNF02	NetBeans Development Platform with Java Language and App Inventor
3	RNF03	Mysql Database Manager

3.7.1 USE CASE DIAGRAM

The Use Case Diagram is a graphical tool used in software engineering to model and describe the interaction between users (or actors) and a system. It is generally used at the beginning of the software development process to help identify the functional requirements of the system and the interactions that occur between its components [28].

The main purpose of the use case diagram is to provide an overview of the system and help understand how it interacts with the external environment. This can help ensure that system requirements are identified and documented clearly and completely.

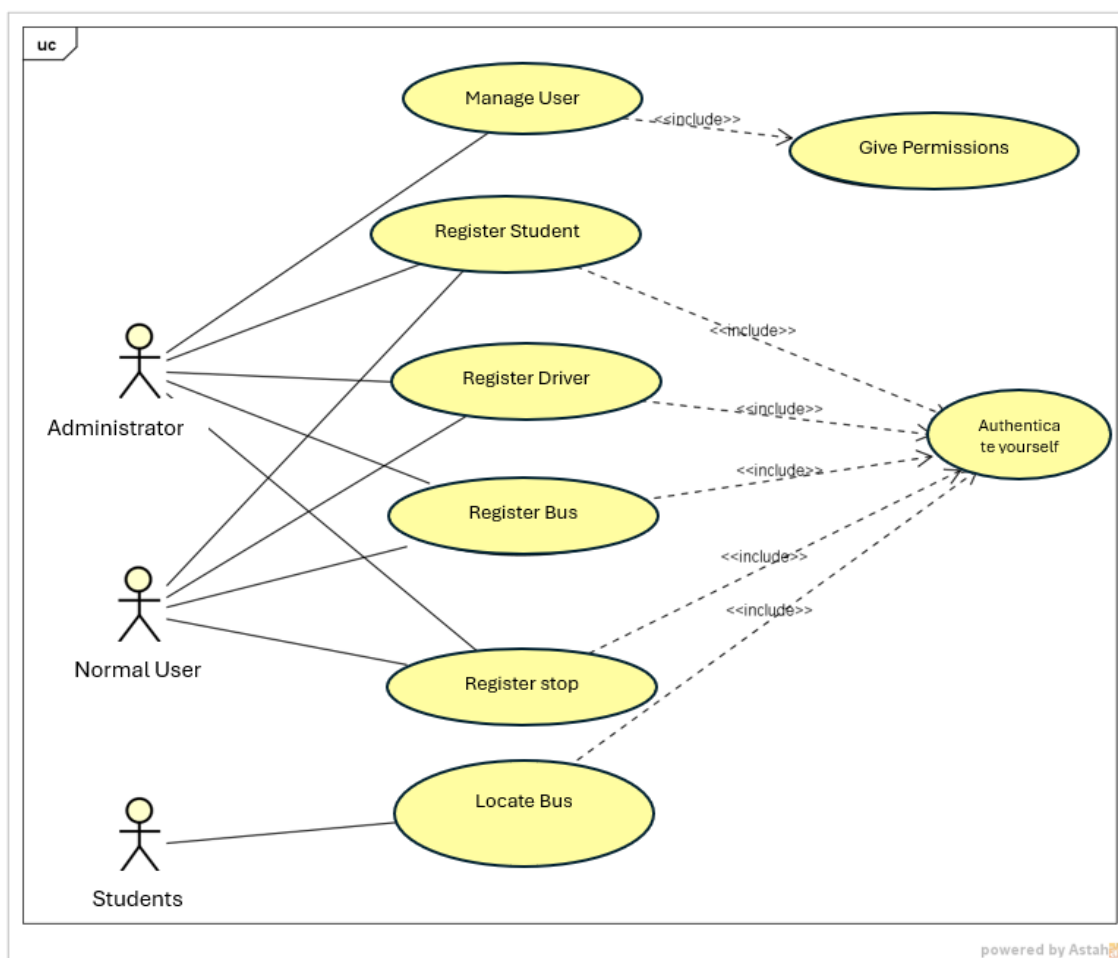


Fig. 3. Use case diagram: "give bus positioning"

3.7.2 PROJECT PREPARATION PHASE

Technological (referring to the capacity of the tools available), skills (of the project members) and political. This is the most critical phase of all, because at the end of this phase the engineering is considered complete and the costs of modifying the system increase as the project progresses.

3.7.3 CLASS DIAGRAM

The main purpose of the class diagram is to visualise the classes that will make up the system, their attributes, methods and how these classes relate to each other [28].

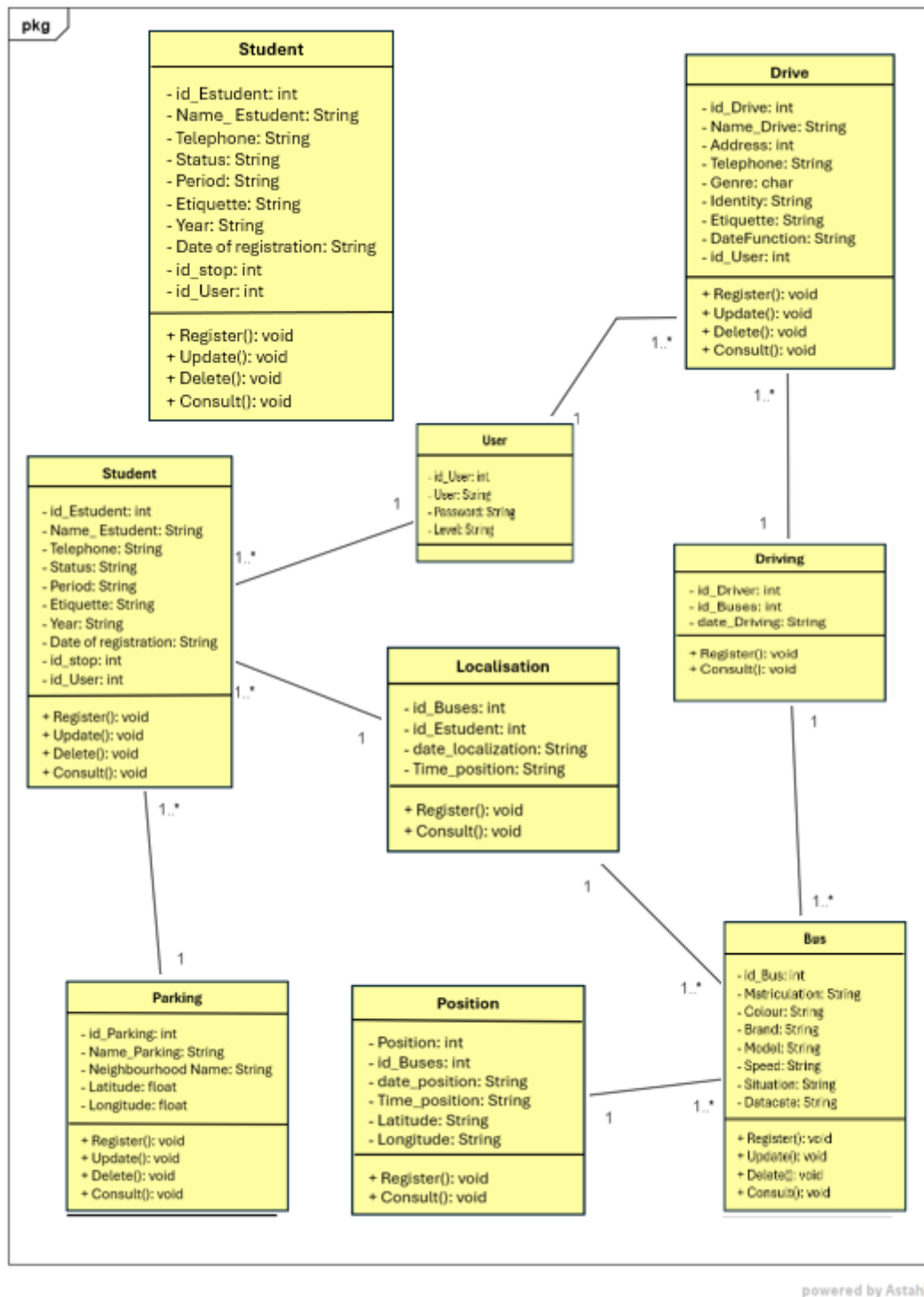


Fig. 4. Class diagram

3.7.4 SEQUENCE DIAGRAM

This type of diagram shows an interaction made up of a set of objects and their relationships, including the messages that can be sent between them. The following figure shows the sequence diagram designed.

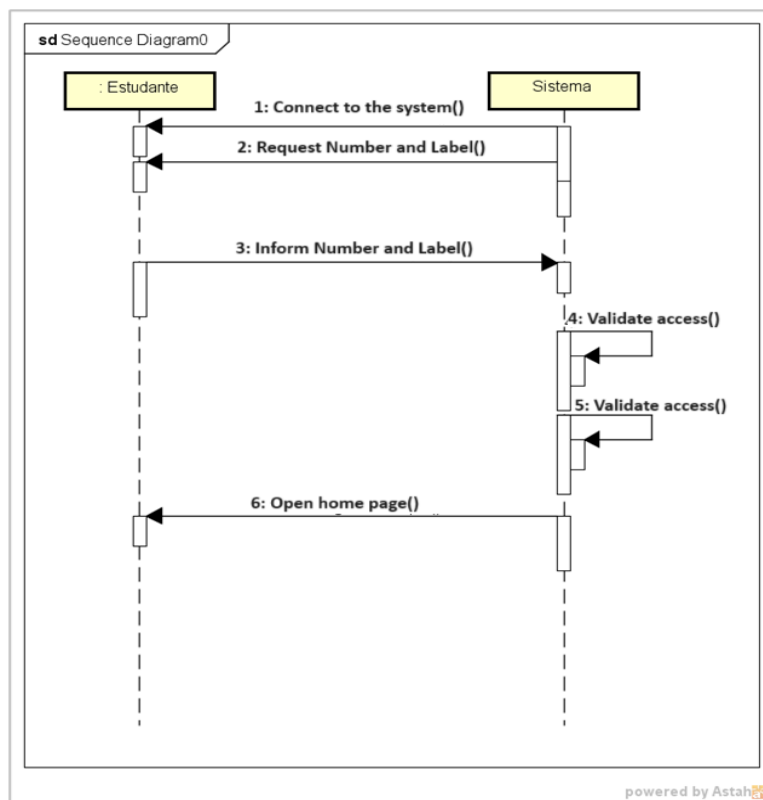
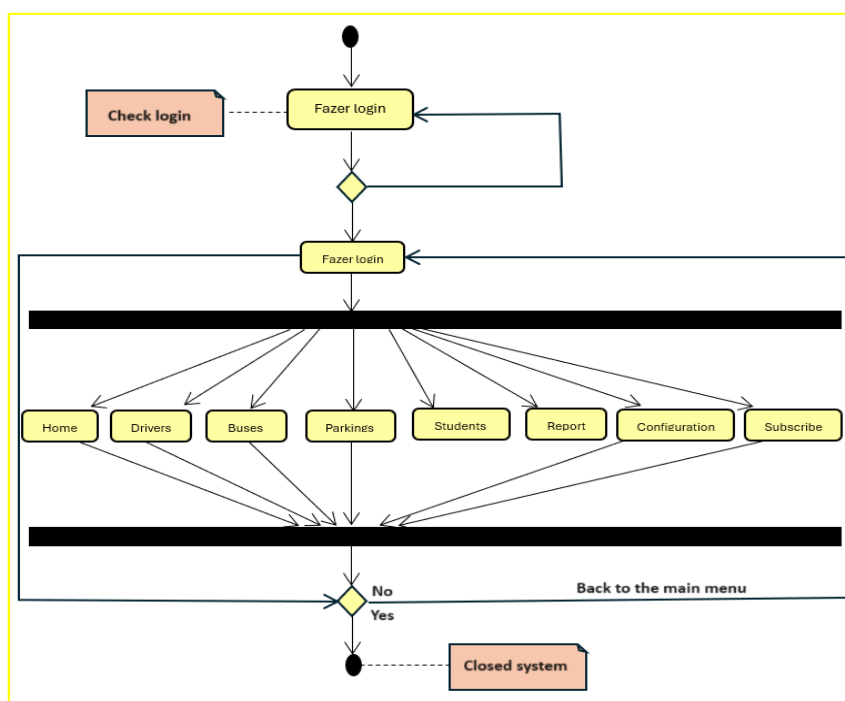


Fig. 5. Sequence diagram "Give bus positioning"

3.7.5 ACTIVITY DIAGRAMS

The activity diagram is a simple modelling element that is most effective for describing workflows in an organisation or for detailing the operations of a class, including behaviours that involve parallel processing [22].



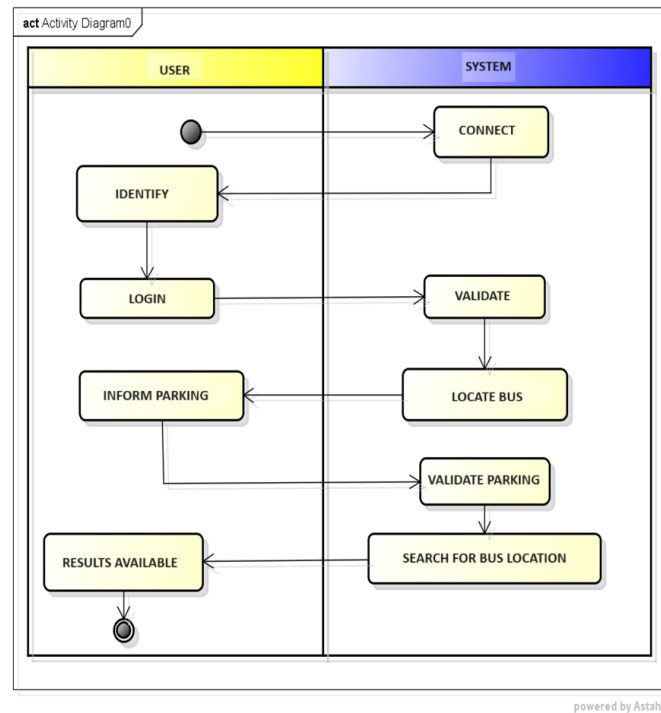


Fig. 6. Activity diagram

3.7.6 CONSTRUCTION PHASE

This phase includes the modelling phase and the development phase itself, where the system is actually programmed. The modelling phase should use some notation defined by the Unified Modelling Language (UML). This is the phase in which the application is created, including the creation of the interfaces, the codes and the respective tests [1].

3.7.7 DATA DICTIONARY

The data dictionary describes the structure of the data used in the system. As an illustration, we have the following tables:

Table 4. Data dictionaries for the students table

Field	Description	Data Type	Note
id_Student	Student's unique identifier	Int	Not Null
Student Name	Student's name	Text (40)	Not Null
Phone number	Student telephone number	Text (40)	Not Null
Status	Student Status	Text (10)	Not Null
Period	Period the student is attending	Text (15)	Not Null
Etiquette	Student identifier when sending SMS to the system	Text (7)	Not Null
Year	Year the student is attending	Text (10)	Not Null
Registration date	Student registration date	Text (40)	Not Null
stop_id	Unique stop identifier	Int	Not Null

Table 5. Data dictionary of the drivers table

Field	Description	Data Type	Note
id_Driver	Driver's unique identifier	Int	Not Null
name_Driver	Driver's name	Text (40)	Not Null
Address	Driver's address	Text (40)	Not Null
Phone number	Driver's telephone number	Text (10)	Not Null
Genre	Driver's gender	Text (15)	Not Null
Identity	Driver's BI	Text (7)	Not Null
Etiquette	Driver's password in the day's signature	Text (10)	Not Null
Job date	Driver registration date	Text (40)	Not Null

3.7.8 TRANSITION PHASE

This is the stage in which the genesis system was tested and validated with the client, in this case the transport department of the UNIKIVI Rectory, in accordance with the requirements set for the system. the aim of this stage is to make the system available, accessible and understandable to the end user. the activities of this stage include training the end users and also carrying out tests on the beta version of the system, in order to ensure that it has the appropriate level of quality.

3.7.9 TEST PROCEDURE

Listed below are the procedures for testing whether GÊNESIS complies with the established objectives, taking into account the previously defined functional and non-functional requirements.

❖ Test with the first procedure

The first test procedure consists of the following parameters:

- A computer with Windows operating system;
- Checking the xampp server and the database management system, in this case MySQL;
- Checking that GÊNESIS is installed on the system;
- Verification of the installation of GÊNESIS on mobile devices;
- Verification of communication between the GÊNESIS desktop application and Arduino;
- Verification of communication between the GÊNESIS Android application and the server.

Table 6. Results of the first test procedure

Nº	Requirements	Result	
		Positive	Negative
01	Computer	✓	
02	Screen resolution	✓	
03	Xampp	✓	
04	Genesis latest version	✓	
Expected results	Check that the computer is ready to run the tests for the established use cases.		

❖ Test with the second procedure

The second procedure consists of:

- Checking the established use cases;
- Checking the integrity of the data in the database;
- Checking the performance of GÊNESIS and Arduino.

Table 7. Results of the second test procedure

Nº	Functional Requirements	Result	
		Positive	Negative
01	User authentication	✓	
02	Register students	✓	
03	Driver registration	✓	
04	Print reports	✓	
05	Find Buses	✓	
Expected results	Check that the computer is ready to run the tests for the established use cases.		

4 RESULTS

GÊNESIS was developed with the aim of facilitating transport management services. To this end, it was designed to be simple and easy to use. The final test results for the functional and non-functional requirements are positive (Table 8).

Table 8. Final test results

Nº	Procedure	Result	
		Positive	Negative
01	Non-functional requirements	✓	
02	Functional requirements	✓	

4.1 LOGIN SCREEN

To gain partial or full access to GÊNESIS, you need to go through the login screen to authenticate (Fig. (a)). To access GÊNESIS (Android App) for students, you need to go through the login (authentication) screen, as shown in figure 6 (b).

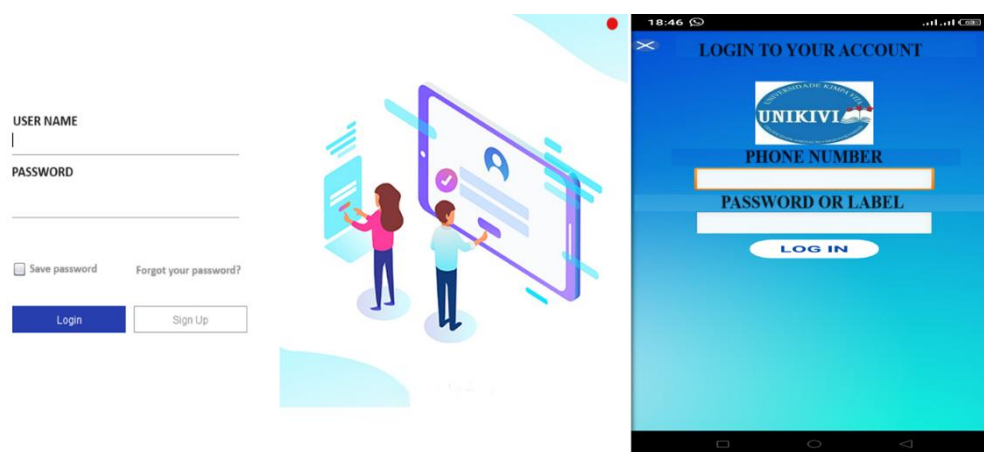


Fig. 7. Login screen

4.2 MAIN MENU

On the system's main screen, the user will have an overview of the data processed by the system, as well as access to the general menu which allows access to all the other system screens



Fig. 8. Main menu screen

4.3 DRIVER REGISTRATION

This interface is where operations relating to drivers are carried out, from registering them to updating other relevant information.

GENESES V 1.0

DRIVER NEW

ACTIVE INACTIVE ALL

DRIVER PRINT

NAME

SEARCH BUS ADDRESS

TELEPHONE

NAME

K. Mpanda

ANDRE

GENDER M

IDENTITY

SAVE CANCEL

BI	ETIQUETTE	DATE
002501UE.001	24R5A	26-11-2021
0000	24R5B	22-11-2021

Fig. 9. Driver registration

4.3.1 STUDENT REGISTRATION

Registration screen: screen responsible for registering the students who will have the privilege of receiving SMS alerts and locating the bus.

Fig. 10. Student registration

4.3.2 BUS CONSULTATION, VISUALISATION AND LOCATION SCREEN

This screen allows students to enter the stops they are at and choose the bus they want to locate in order to obtain its position on Google Maps (a). This screen allows the position of the bus to be visualised using the Google Maps API (b).

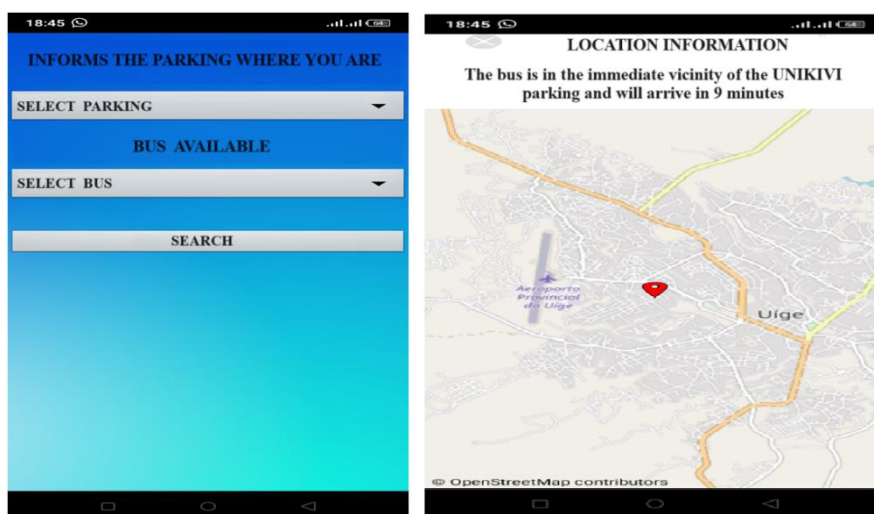
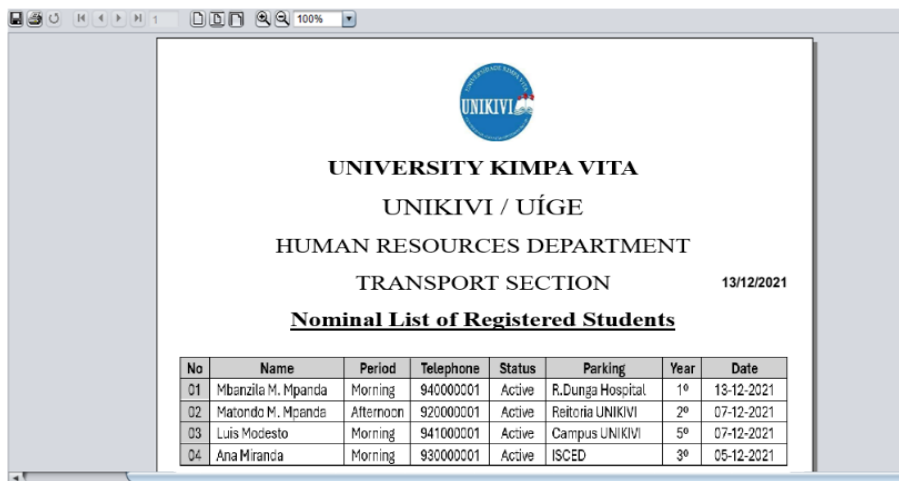


Fig. 11. Bus location information

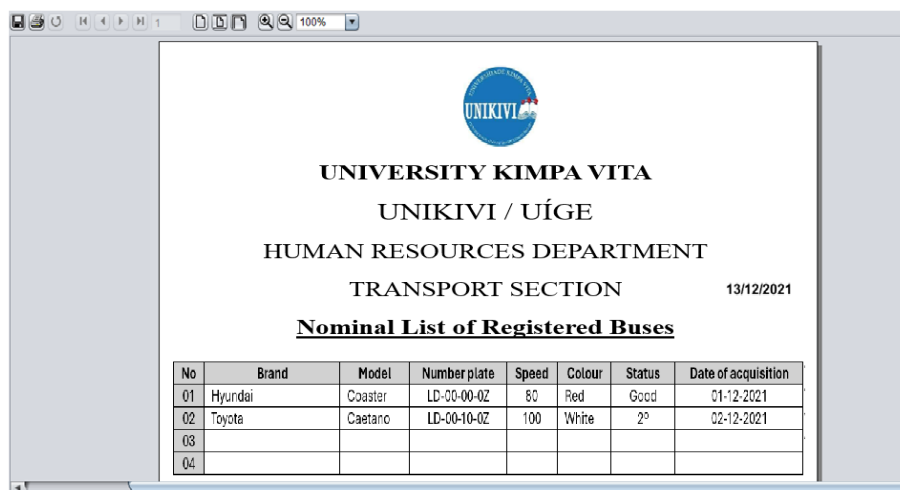
4.3.3 REPORT

A report is a document drawn up to report on a given situation. However, more than just a report, it contains information in an organised and summarised form, so that the recipients can understand the context and analyse it clearly.



No	Name	Period	Telephone	Status	Parking	Year	Date
01	Mbanzila M. Mpanda	Morning	940000001	Active	R.Dunga Hospital	1º	13-12-2021
02	Matondo M. Mpanda	Afternoon	920000001	Active	Reitoria UNIKIVI	2º	07-12-2021
03	Luis Modesto	Morning	941000001	Active	Campus UNIKIVI	5º	07-12-2021
04	Ana Miranda	Morning	930000001	Active	ISCED	3º	05-12-2021

Fig. 12. Registered Students Report



No	Brand	Model	Number plate	Speed	Colour	Status	Date of acquisition
01	Hyundai	Coaster	LD-00-00-02	80	Red	Good	01-12-2021
02	Toyota	Coaster	LD-00-10-02	100	White	2º	02-12-2021
03							
04							

Fig. 13. Report of registered buses

4.4 INTERPRETING THE SYSTEM

After building the system, the first stage consists of coding the SIM808 GSM, GPRS Quad Band, GPS and Bluetooth module in the Arduino IDE. To do this, it is necessary to include the <DFRobot_sim808.h> library, which allows the Arduino board to communicate with the satellite, providing information such as latitude, altitude and longitude and carrying out serial communication between the Arduino and the module.

4.4.1 SYSTEM ELECTRONIC CIRCUIT

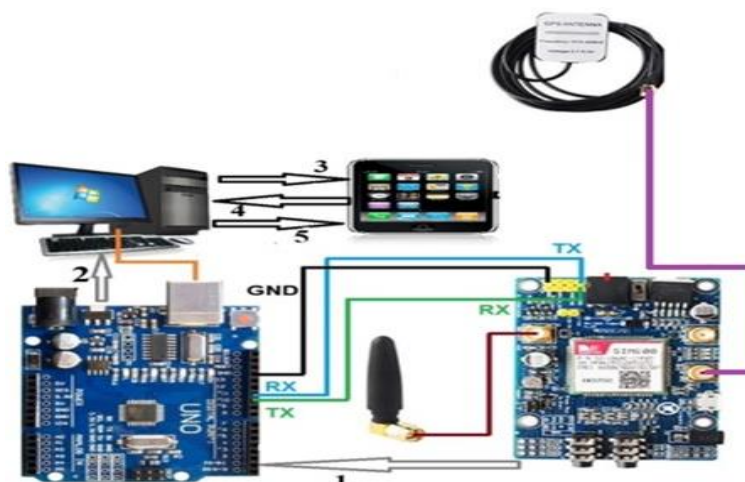


Fig. 14. System electronic circuit

4.4.2 OPERATION OF THE SYSTEM'S ELECTRONIC CIRCUITRY

Table 9. Electronic circuit operation

Sequence	Interpretation
1	SIM808 sends the coordinates to the Arduino
2	Arduino in turn sends the coordinates to the system where they will be stored
3	The SIM808 module sends SMS alerts when the bus is running.
4	The student tracks the positioning of the bus
5	The system, in turn, sends the coordinates to the students, allowing them to visualise the positioning of the bus using Google Maps.

5 CONCLUSION

This article presents the development of the GÊNESIS system, which is an alert and geolocation system to notify by SMS about the operation of the Kimpa Vita University buses on working days and locate the buses via an Android App. To meet the needs, interview, observation and survey techniques were used, as well as analytical and historical methods.

With the support of the RUP methodology and technological tools such as MySQL, NetBeans (java language), Astah Comunity and Arduino, it was possible to realise the system. The specific objectives were achieved, since the system is viable and easy to use, allowing students and staff to receive alerts about the buses' operation and locate their position via the Android app.

REFERENCES

- [1] Arsanjani, A., Johnston, S., & Smith, J, The RUP Update for ServiceOriented Architecture. Rational Software White Paper, 2005.
- [2] Banzi, M., Getting Started with Arduino, O'Reilly Media Inc, 2010.
- [3] Beck, K. and Fowler, M., 1ª edição Planning Extreme Programming, Addison Wesley, 2000.
- [4] Blaha, M., Rumbaugh, J., 2. ed., Modelagem e Projectos Baseados em Objetos com UML 2. Tradução Daniel Vieira. Rio de Janeiro: Elsevier.2006.
- [5] Buschmann, F., Meunier, R., Rohnert, H., Sommerlad, P., Stal, M. (1996). Pattern-Oriented Software Architecture, John Wiley and Sons, New York, NY.
- [6] Cockburn, A. (2005). Escrevendo Casos de Uso Eficazes, Porto Alegre: Bookman.
- [7] Crocker, P. More than maps: the evolution of location-based applications.

- Disponível em: http://www.decarta.com/files/gigaom_more_than_maps. 2014.
- [8] Dall’ogio, P., 2ª ed PHP Programando Com Orientação a Objetos, Novatec. 2009.
- [9] Deitel, H. M., Deitel, P. J. 6. ed., Java Como Programar; tradução Edson Furmankiewicz; revisão técnica. São Paulo: Pearson. 2005.
- [10] Flávio, B. (n.d). Aprenda Arduino do zero.
Disponível em: <https://flaviobabos.com.br/wp-content/uploads/2020/11/o-guia-definitivo-para-aprender-arduino-na-pratica-1.pdf>.
- [11] Fonseca, E. G. P. (2010) – BEPPU, Mathyan Motta – Arduino – UFFCT. Glovacki Graneman de Melo, J. L., & Baraniuk, J., (2012). Minicurso de Arduino. Curitiba.
- [12] Google Maps. (2013). API do Google Maps - Criar aplicativos com base no local. Acesso em.
Disponível em: <https://developers.google.com/maps/locationbased-apps>. fev, 14,2023.
- [13] Guedes, G. T. A. 2a edição UML – 2. Uma Abordagem Prática. São Paulo: Novatec Editora., P., (2000). The Rational Unified Process – An Introduction, AddisonWesley. 2009.
- [14] Kruchen, P. Introdução ao RUP – Rational Unified Process, Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda. 2003.
- [15] Larman, C. (2007). Utilizando UML e Padrões: uma Introdução a Analise e ao Projecto Orientados a Objetos, Porto Alegre: Bookman.
- [16] Lawrence, S. P. (2004). Engenharia de Software. (D. Franklin, Trad.) São Paulo: ABDR.
- [17] Lecheta, R. R. (2010). Google Android: aprenda a criar aplicações para dispositivos móveis com o Android SDK. São Paulo: Novatec.
- [18] Mamede, H. S. Segurança Infomática nas organizações. Lisboa: FCA. 2006.
- [19] Meike, B. et al. Desenvolvimento de aplicações android. São Paulo: Novatec. 2009.
- [20] Menjoge, Z. Software Development using the Knowledge Insight Approach. North Carolina State. Thesis [Master of Science in Computer Science] North Carolina State University. 2003.
- [21] Michael, M., 2ª ed, Iniciando Arduino (Tecnologia em Ação). 2010.
- [22] Nunes, M. & O’Neill, E., Fundamento de UML. Rio de Janeiro. Ponta Grossa. 2015.
- [23] Oliveira, J. A., Sistema de gestão de uma frota de veículos baseados em GPS.Lisboa- Portugal: Mariana Vasques. 2014.
- [24] Paulo, C. S. (2019). Projecto de Software Usando UML. Acesso em 07/02/2023.
Disponível em: <https://www.escavador.com/sobre/6981859/paulo-cezar-stadzisz>.
- [25] Peterson, L. L. & Davie, B.S. (2007). Computer Networks – A System Approach. 4ª Ed., Editora Elsevier.
- [26] Pollice, G. (2001). Using the IBM Rational Unified Process for Small Projects: Expanding Upon eXtreme Programming. Rational Software White Paper.
Disponível: <<http://www3.software.ibm.com/ibmdl/pub/software/rational/web/whitepapers/2003/tp183.pdf>>.
- [27] Ribeiro, M. A. Automação Industrial, 4ª ed., Salvador: Tek Treinamento & Consultoria Ltda. 2001.
- [28] Runeson, P. and Greberg, P. Extreme Programming and Rational Unified Process – Contrasts or Synonyms? Lund University, Sweden. 2004.
- [29] Santos, N. P. Arduino, Introdução e Recursos Avançados. 2009.
- [30] Woodill, G. The Mobile Learning Edge: 1st ed, Tools and Technologies for Developing Your Teams, McGraw-Hill, Ed., Available: <http://www.mobilelearningedge.com>. 2010.

Avocado Oil Extraction (Persea Americana Mill) by Laboratory and Artisanal Methods

Nswadi Kinkela^{1,2}, Nswadi Nsayi Metos³, Mpanda Makambua Athos⁴, Lukuama Ngesevua Bienvenu Doudou⁵, and Jesus Miguel López Rodilla⁶

¹Department of Agronomic, Polytechnic Institute of the Kimpa Vita University, Angola

²Department of Chemistry, University of Beira Interior, Portugal

³Department of Chemistry, Pedagogical Institute of Mbanza-Ngungu RD Congo

⁴Department of Agronomic, Institute of Agronomic Studies in Mvuazi, RD Congo

⁵Department of Chemistry, Pedagogical Institute of Mbanza-Ngungu RD Congo

⁶Department of Chemistry, University of Beira Interior, Portugal

Copyright © 2024 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The aim of this study was to extract avocado oils using the laboratory method (Soxhlet) and the artisanal method. To achieve the research objective, an artisanal oven was used to dry the avocado pulp and a device was adapted for artisanal oil extraction. The oils obtained by hand were compared to those extracted in the laboratory on the basis of organoleptic, physical and chemical analyses. The following parameters were assessed: colour, density (d), saponification index (IS), iodine index (II), acidity index (IA), ether index (IE), peroxide index (IP) and unsaponifiable matter. Volumetric methods were used for the quantitative determination of these indices. The oil analyses were carried out in duplicate and the following results were obtained: The oils extracted in the laboratory and by hand showed a dark green colour. With regard to the physical and chemical parameters, the following averages were obtained: density - laboratory oil (OL): 0.912 g/cm³; artisanal oil (OA): 0.911 g/cm³; -acidity index OL: 5.609 mg KOH/g; OA: 4.515 mg KOH/g; -iodine index OL: 88.706 g I₂/g; OA: 82.357 g I₂/g; -saponification index OL: 190.68 mg KOH/g; OA: 189.14 mg KOH/g; -ester index OL: 185.071 mg KOH/g; OA: 184.62 mg KOH/g; -peroxide index OL: 10.12 mEqO₂/kg; OA: 9.89 mEqO₂/kg; -unsaponifiable matter content OL: 1.506%; OA: 1.5204%.

KEYWORDS: Persea americana Mill, extraction, analysis.

1 INTRODUCTION

Throughout history, plants have played a fundamental role in the lives of both humans and animals. They are often present in our daily lives and are frequently consumed [14].

Among the various plants, oilseeds stand out, as they have a high oil content in their seeds and fruits and can be used to produce vegetable oil and for different purposes [22]. The avocado, one of these oilseeds, is widely consumed in Angola's Uíge province in the fresh form of its fruit, known as avocado.

As well as being eaten fresh, the population can benefit from the avocado fruit in processed form, with oil extraction being an important aspect of its industrialisation [17]. Avocado oil is a vegetable oil extracted from the avocado tree and is used in a

variety of applications, including food, the production of pharmaceutical products and cosmetics. It can also be applied directly to the skin and hair, thanks to its richness in vitamins and bioactive compounds, helping to treat healthy skin and hair.

The avocado tree, which belongs to the Lauraceae family and the *Persea* genus, is found in all tropical and subtropical areas of the world. Among the species of this genus, *Persea americana* is the most relevant and studied, according to [12].

The chemical composition of avocado pulp ranges from 67 to 78% moisture, 13.5 to 24% lipids, 0.8 to 4.8% carbohydrates, 1.0 to 3.0% protein, 0.8 to 1.5% ash, 1.4 to 3.0% fibre and an energy density of between 140 and 228 kcal (Soares et al., 2000). In addition, studies indicate that avocado oil has excellent nutritional quality, with high lipid, protein, vitamin and mineral content, and has great economic potential for the pharmaceutical, food, cosmetics and biofuel industries [3], [20].

However, the avocado is a highly perishable fruit with a short shelf life, which means that it cannot be stored for long periods as it deteriorates quickly. This characteristic represents one of the difficulties faced by consumers and sellers. Given the socio-economic importance of avocados, processing them into oil could be an alternative for meeting the needs of the population of Uíge.

This work is structured as follows: Section 1 is an introductory part. Section 2 details the materials and methods. Section 3 presents the results of the oil extraction and analysis. Section 4 details the discussion of results. Finally, section 5 presents the final considerations.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 ORIGIN OF THE RAW MATERIAL

The Fuerte avocado variety is a Guatemalan-Mexican hybrid that is very popular in many parts of the world. It is a large, round fruit with a smooth, dark green skin that becomes a little lighter when ripe. The flesh of the Fuerte avocado is creamy and soft, with a pale green colour that is mild on the palate. The taste of the Fuerte avocado is slightly sweet, but with a rich, smooth flavour, making it a popular choice for many recipes, including guacamole and salads. In addition, the Fuerte variety is known for its high productivity and resistance to disease, making it a popular choice among avocado growers.

The avocados were purchased from local markets in the city of Uíge, where good quality fruit ideal for consumption was chosen. We used the Fuerte variety, a Guatemalan-Mexican hybrid, which is easily found in markets, supermarkets and the rural areas of Uíge. The fruit's vernacular names are: avocat or poire d'avocat (French); avocado (English); divoka, voka or savoka (Kikongo).



Fig. 1. Fuerte avocado

2.2 SAMPLE PREPARATION

- Choose ripe and healthy avocados. Make sure there are no signs of deterioration;
- Wash with tap water;
- Cut the avocados in half using a stainless steel knife and remove the pit;
- Remove the avocado pulp from the skin using a spoon;
- Grind the pulp with a blender;
- Pour the crushed pulp onto an aluminium tray and dry in a homemade oven ($\pm 50^{\circ}\text{C}$) for 48 hours;
- After drying, store the dried material until the extraction process.

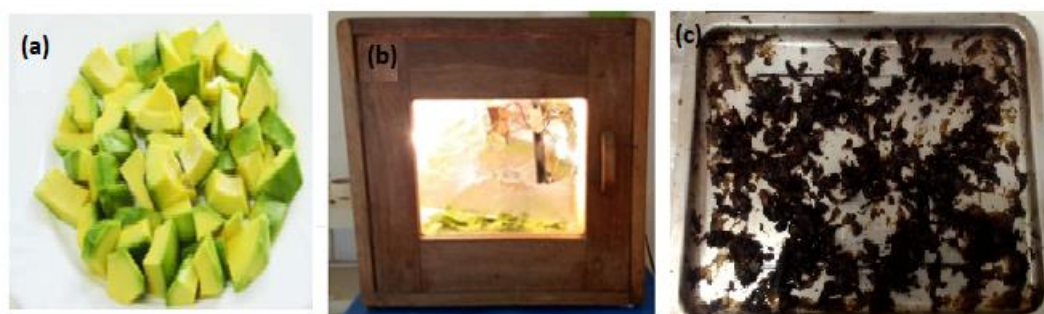


Fig. 2. (a) Fresh avocado pulp (b) Drying of the pulp in an artisanal oven (c) Dried avocado pulp

2.3 OIL EXTRACTION

2.3.1 LABORATORY EXTRACTION

The Soxhlet method was explored, an effective and simple technique without altering the properties of lipid substances.



Fig. 3. (a) Soxhlet extraction (b) Solvent evaporation

2.3.1.1 PRINCIPLE

The Soxhlet method is a gravimetric process based on the weight loss of the material extracted with solvent (chloroform).

2.3.1.2 EXPERIMENTAL PROCEDURE

- Weigh the sample (10g);
- Place 10g of the sample (dried avocado pulp) inside the Soxhlet cartridge (filter paper);
- Place the cartridge containing the sample inside the Soxhlet extractor;
- Connect the Soxhlet extractor to a round-bottom flask (250 ml) and add 150ml of chloroform;
- Connect the setup to a condenser;
- Turn on the heating mantle and start the extraction (8 hours);
- After 8 hours, turn off the heating mantle;
- Allow the solution to cool while maintaining water circulation through the condenser;
- Disassemble the system to recover the solution (oil - solvent) from the flask;
- Distill the solution to separate the solvent from the oils using a rotary evaporator;
- Recover the oil and store it in an airtight container in the refrigerator until analysis.
- Determine the extraction yield using the equation:

$$\text{Oil content (\%)} = \frac{\text{mass of oil obtained from extraction}}{\text{dry mass of the sample}} * 100$$

2.3.2 ARTISANAL EXTRACTION

2.3.2.1 DESCRIPTION OF THE ARTISANAL EXTRACTOR

The extractor is a cylindrical device made of steel and supported by three legs. Its upper opening, where the up and down movements of the metal disc occur, has a shaft supported by an arm similar to a car steering wheel, used to apply pressure. At the bottom of the extractor is a sieve used to filter the pressed paste, which is then poured into a container below to collect the oil.



Fig. 4. *Homemade extractor*

2.3.2.2 PRINCIPLE

The method consists of introducing the paste into the cylinder and selecting a group of three people with sufficient physical strength to apply pressure to the handmade extractor.

2.3.2.3 EXPERIMENTAL PROCEDURE

- Weighing the sample;
- Lightly heat the sample and insert it into the extractor;
- Press continuously with your hands until the oil stops flowing;
- Weigh the quantity of oil obtained.

3 RESULTS

3.1 LABORATORY AND ARTISANAL EXTRACTION OF AVOCADO OIL

The experiment was repeated five times for both extraction methods.

3.1.1 LABORATORY EXTRACTION



Fig. 5. Oil extracted by soxhlet

Table 1. Oil yield using the soxhlet method

Test number	1	2	3	4	5	Average
Mass (g)	6,59	6,41	6,74	6,76	6,84	6,668
Yield (%)	65,9	64,1	67,4	67,6	68,4	66,68

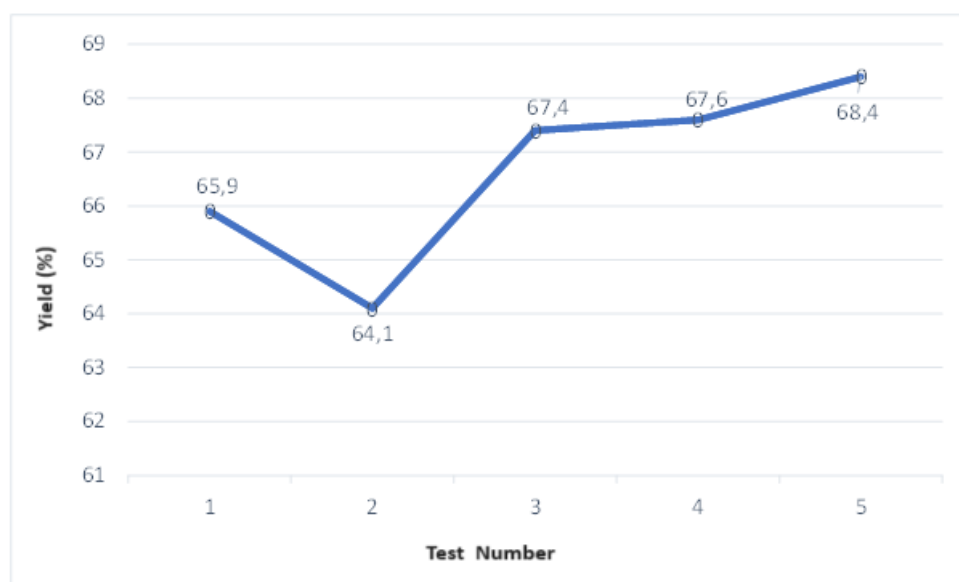


Fig. 6. Soxhlet extraction yield

Using 10g of sample for each extraction, an oil mass ranging from 6.59 to 6.84g was obtained, with a final average of 6.668g, corresponding to 66.68% of the total. The results confirm that the avocado variety used contains a significant lipid content in its pulp. During the extraction process, it was noted that the fat content increases proportionally with the number of siphons. Thus, the amount of oil obtained depends both on the number of siphons used in the extraction system and the variety of the material used.

3.1.2 ARTISANAL EXTRACTION



Fig. 7. Oil extracted by hand

Table 2. Lipid content by the artisanal method

Test number	1	2	3	4	5	Average
Mass (g)	167,42	163,98	167,06	161,30	165,69	165,09
Yield (%)	55,80	54,66	55,68	53,76	55,23	55.03

Source: Authors



Fig. 8. Yield from artisanal extraction

Using 300g of sample in five consecutive extractions, a mean oil mass of 165.09g was obtained, corresponding to 55% oil. Compared to Soxhlet extraction, the artisanal oil yield is low. This can be attributed to two reasons:

1. Extracting all the oil present in the sample during this extraction process can be challenging, as it depends on the physical strength of the individual applying the necessary pressure.
2. The extraction was performed at room temperature, as the artisanal extractor does not have a heating system to generate heat during the process, making it impossible to keep the sample warm.

3.2 ANALYSING OILS

Remember that the principles, materials and reagents used to analyse the oils extracted in the laboratory are the same as those used to analyse the oils obtained by hand.

The oil samples were analysed in duplicate, following the classic analytical methods described in the Analytical Standards of the Adolf Lutz Institute [2].

The following characteristics were assessed: colour, density (d), acidity index (AI), saponification index (IS), ester index (IE), iodine index (IO), peroxide index (IP) and unsaponifiable matter (I.ins).

Table 3. Average values obtained from oil analysis [1], [24]

Parameters	Calculated and obtained values		Bibliographical data
	OL	OA	
Colour	Dark green	Dark green	Dark green
d (25°C) g/cm ³	0,912	0,911	0,910 -0,920
IA (mg KOH/ g	5,609	4,515	1 - 7
II (g I ₂ /100g)	88,706	82,357	75,0-100,0 82,0 - 90
IS (mg KOH/g)	190,68	189,14	177- 198
IE (mg KOH/g)	185,071	184,62	176- 191
I Ins (%)	1,506	1,5204	1,0 -6,0
IP mEq/ Kg	10, 12	9,89	10,0

4 DISCUSSION OF RESULTS

The physicochemical characteristics of the oils (both laboratory and artisanal) were analysed in duplicate. The values shown in Table 3 represent the average of the values for each parameter analysed.

The laboratory oils and the handmade oils were dark green in colour. On consulting the literature, it was found that, according to the standards established by the Codex Alimentarius Committee on Fats and Oils (2019), crude avocado oils should have a green colour, and the oils obtained by the two extraction methods observed were within the expected standard for this category of oil.

The density of a lipid is defined as the mass of material required to occupy a given volume. For liquid oils, the density tends to be between 0.91-0.93 g/mL at room temperature, and decreases with increasing temperature [18].

This variable is used to standardise and control the process and the quality of the processed product. In the food industry, density is commonly used as a process control parameter [15].

The values found for the density of the oils analysed in this study are within the range of values required by legislation at 25 °C, indicating that the oil samples maintained their quality.

The acidity index corresponds to the amount of base needed to neutralise the free fatty acids present in the oil or fat.

A high acidity index indicates that the oil is undergoing triacylglycerol hydrolysis, releasing fatty acids and glycerol, which may indicate that the product is undergoing an accelerated deterioration process [19].

According to the results obtained, the acidity index of the laboratory oil and the artisanal oil are 5.609 and 4.515 respectively. The values obtained are within the permitted limit according to the literature, which is between 1-7 [1].

It is known that the acidity index is an important factor in oil quality, providing valuable information about the state of conservation of the oil. Higher acidity index values can indicate accelerated deterioration of the oil. However, the values obtained for the extracted oils indicate that they are in good quality condition and can be used.

The iodine index is an indicator of the degree of unsaturation of the fatty acids present in the oils, and the higher the index, the greater the possibility of oxidative rancidity [7].

The peroxide index is a measure of the degree of oxidation of the oil, indicating how far oxidation has progressed. The peroxides present indicate the development of rancidity [4]. This index reveals the degree of lipid oxidation, which is the main cause of oil deterioration, altering the organoleptic quality of the product [21].

Both the iodine index and the peroxide index are related to the degree of lipid oxidation [12]. In relation to the results obtained and compared with the international standards, [1], [9], and the results of other researchers [24], it was observed that the iodine index values of the oils analysed are within the recommended values. As for the peroxide index, there was a

small, non-significant difference and no unpleasant changes in the colour or odour of the oils. This indicates that the drying and extraction methods adopted were adequate and did not allow oxidative degradation of the product.

According to [16], the saponification index is the amount of alkali required to saponify a defined quantity of oil and/or fat. It is one of the important characteristics, providing an indication of the relative amount of high and low molecular weight fatty acids. Although it is not suitable for identifying oils and fats, it is useful for checking the average molecular weight and adulteration by other oils with different saponification indices [7]. The values found in this study were 190.68 for the laboratory oil and 189.14 for the artisanal oil, which is close to and within the standard range established by the [2]. The high value of this index suggests the presence of long-chain, high molecular weight carbon compounds.

The ester index (I.E.) is defined as the difference between the number of milligrams of potassium hydroxide consumed to saponify (I.S.) and the number of potassium hydroxide consumed to neutralise 1 gram of fat (I.A). This index is influenced by the saponification index, the acidity index and the content of fatty acids present in the oils.

The values obtained in this study are satisfactory, with an average of 185.071 for the laboratory oils and 184.62 for the artisanal oils, which is within the desirable range according to the literature. These results indicate a high content of unsaturated fatty acids, which justifies the liquid state of the oils.

Unsaponifiable matter: corresponds to the total amount of substances dissolved in oils and fats after saponification, which are insoluble in aqueous solution but soluble in common fat solvents. The experimental values obtained for unsaponifiable matter were 1.506 for laboratory oils and 1.520 for artisanal oils, within the range observed by Tango and Turratti in 1992. The results show that the content of unsaponifiable matter, being the natural antioxidants present in the oils analysed, protects them from degradation and guarantees their nutritional and organoleptic quality.

5 CONCLUSION

This study compared two methods of extracting avocado oil: one carried out in a laboratory and the other by hand. The artisanal extraction used in this work is a simple, effective and less expensive technique, allowing a purely natural product to be made available to the population of Uíge, while preserving its nutritional quality.

An artisanal oil extractor was created that resulted in a virgin product, and its quality was compared with that of avocado oils extracted in the laboratory using the Soxhlet method. Various physical and chemical parameters such as colour, density, saponification index, iodine index, acidity index, ether index, peroxide index and unsaponifiable matter were assessed. The results were satisfactory and indicated that the oils extracted by the artisanal method had physical and chemical properties comparable to those extracted in the laboratory.

Based on the results of the oil analyses carried out in this study, we can say that the oil extracted by hand is of good quality. The oil is dark green in colour and has the desired density according to oil standards. In addition, the quality indices were satisfactory.

REFERENCES

- [1] A.O.A.C, 15 ed, Official methods of analysis of the Association Analytical Chemists., v.2, 1990.
- [2] AOCS, 5th ed. American Oil Chemists Society; Official Methods and Recommended Practices of the AOCS,,Champaign: EUA. 2000.
- [3] Bhuyan, D. J., Alsherbiny, M. A., Perera, S., Low, M., Basu, A., Devi, O. A., Barooah, M. S., Li, C. G., Papoutsis, K.,The odyssey of bioactive compounds in avocado (*Persea americana*) and their health benefits. *Antioxidants*, Basel, v. 8, n. 10. 2019.
- [4] Caires, L. G., Óleos vegetais como matérias-primas para coletores, 1992.
- [5] Carvalho, C. R. L., Soares, N. B., Tango, J. S., Caracterização física e química de frutos de abacate visando a seu potencial para extração de óleo. *Revista*, 2002.
- [6] Cecchi, H. M., Fundamentos teóricos e práticos em análise de alimentos. Campinas: Editora da Unicamp. 1999.
- [7] Cecchi, H. M., 2.ed. Fundamentos Teóricos e Práticos em Análise de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas. São Paulo: UNICAMP. 2003.
- [8] Cecchi, H. M., 2ª Ed. Fundamentos teóricos e práticos em análise de alimentos. Editora da UNICAMP: rev.- Campinas, SP, editora da UNICAMP. 2003.
- [9] Codex alimentarius commission.,. Codex-Stan 210: codex standard for named vegetable oils. Roma: FAO/WHO Food Standards. 2009.
- [10] Ding, H., Chin, Y. W., Kinghorn, A. D., Chemopreventive characteristics of avocado fruit. *Net*, Columbus, v. 17 n. 5. 2007.

- [11] Ding, H., Chin, Y. W., Kinghorn, A. D., D'ambrosio, S. M., Chemopreventive characteristics of avocado fruit. *Seminars in Cancer Biology*, v.17. 2007.
- [12] Fernández, E. H., Guitié, A. F., Pancorbo, A. C., Avocado fruit - *Persea americana*. *Exotic Fruits Reference Guide*. Elsevier. 2018.
- [13] Instituto Adolfo Lutz, Métodos físico-químicos para análise de alimentos/coordenadores Odair Zenebon, Neus Sadocco Pascuet e Paulo Tiglea -- São Paulo. 2008.
- [14] Kingsley R. Stern; - *Introductory Plant Biology* WCB Publishers. 1994.
- [15] Laurindo, J. B., Larotonda, F. D. S., Matsui, K. N., Paes, S. S., Um dispositivo simples para a determinação simultânea e contínua da densidade de líquidos e da concentração de suspensões líquidas. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*. v.24, n.2. (2004).
- [16] Lutz., 4ª ed. Instituto Adolfo. Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz. Métodos físico-químicos para análises de alimentos. (1ª Edição digital). 2008.
- [17] Martin, Z. J. et al., 2ªed, Abacate: cultura, matéria-prima, processamento e aspectos econômicos. Campinas, SP: ITAL,. 1991.
- [18] McClements, J. D., Decker, Éric A. L. I., Damodaran, S., Parkin, K. L., Fennema, O. R., 4ª ed, Química de alimentos de Fennema. Porto Alegre: Artmed Editora. 2009.
- [19] Ordonez, Juan A. et al., Tecnologia de alimentos: Componentes dos alimentos e processos (vol. 1). Porto Alegre: Artmed. 2005.
- [20] Qin, X., Zhong, J. A., Review of extraction techniques for avocado oil. *Journal of Oleo Science*, v. 65, n. 11,. <http://dx.doi.org/10.5650/jos.ess16063>. PMID: 27725362. 2016.
- [21] Ribeiro, E. P., Seravalli, E. A. G., Química de alimentos. São Paulo: Instituto Mauá de Tecnologia, Edgard Blucher. 2004.
- [22] Sluszz, T., Machado, J. A. D., Culturas matérias-primas para biodiesel e o potencial de adoção pela agricultura familiar nas diferentes regiões brasileiras. In: PADILHA, A. C. M.; GOLLO, S. S.; SILVA, M. N. (Org.). *Estudos na Cadeia Produtiva do Biodiesel*. 1.ed. Jaguarão: Unipampa, v.1. 2012.
- [23] Soares, H. F., Ito, M. K., The monounsaturated fatty acid from avocado in the control of dyslipidaemia. *Revista Ciencia Médica*, v. 9, n. 2. 2000.
- [24] Tango, J. S., Turatti, J. M., Óleo de abacate. In: ABACATE – cultura matéria-prima, processamento e aspectos econômicos. Campinas: ITAL. 1992.
- [25] Guillén, M. D., Uriarte, P. S., Simultaneous control of the evolution of the percentage in weight of polar compounds, iodine value, acyl groups proportions and aldehydes concentrations in sunflower oil submitted to frying temperature in an industrial fryer. *Food Control*, v. 24, n. 1-2. 2012.

Impact à long terme des amendements phosphatés sur la dynamique du fer dans les sols rizières acides touchés par la toxicité ferreuse au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire

[Long-term effects of phosphate amendments on iron dynamics in acid rice soils affected by iron toxicity in west-central Côte d'Ivoire]

Kouassi Pla ADOU¹, Konan-Kan Hippolith KOUADIO¹, Affi Jeanne BONGOUA-DEVISME¹, Franck Michaël Lemonou BAHAN², and Anselme Kan Louis KOKO³

¹Laboratoire de Pédologie, UFR Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université Felix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire

²Centre National de Recherche Agronomique-CNRA, Station de Recherche de Man, Programme riz, Man, Côte d'Ivoire

³Office Chérifien des Phosphates (OCP) Africa, Côte d'Ivoire

Copyright © 2024 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 the tropical acidic soils of Gagnoa, Côte d'Ivoire, rice cultivation is hindered by phosphorus immobilization due to iron and aluminum oxides. Phosphate amendments, such as phosphate rock (RP) and triple superphosphate (TSP), are used to improve phosphorus availability but can remobilize iron, particularly in temporarily flooded lowland rice fields. This study evaluates the effect of eight phosphate amendment formulations on iron dynamics in acidic rice soils. Tested on five plots over three crop cycles, the formulations showed a significant reduction in leaf yellowing symptoms and brown spots, with a decrease of 50% in yellowed leaves and 43 to 67.6% in brown spots compared to unamended plots. Additionally, grain and straw yields increased due to reduced infertile tillers and panicle sterility. Regarding iron dynamics, the amendments reduced soluble, exchangeable, acid-soluble, and bioavailable iron fractions, leading to better yields and reduced iron toxicity. TSP, with its rapid solubility, proved effective in the short term, but its effects diminished over time. In contrast, RP, with its slow phosphorus release, maintained stable yields and reduced toxicity symptoms. These results highlight the importance of choosing the appropriate phosphorus form based on soil conditions to optimize long-term rice productivity.

KEYWORDS: iron toxicity, brown spots, leaf yellowing, iron forms, acidic soils, amendment, bioavailable iron.

RESUME: Dans les sols acides tropicaux de Gagnoa, Côte d'Ivoire, la culture du riz est freinée par l'immobilisation du phosphore due aux oxydes de fer et d'aluminium. Des amendements phosphatés, comme la roche phosphatée (RP) et le triple super phosphate (TSP), sont utilisés pour améliorer la disponibilité du phosphore, mais peuvent remobiliser le fer, surtout dans les rizières temporairement inondées. Cette étude évalue l'effet de huit formulations d'amendements phosphatés sur la dynamique du fer dans les sols rizières acides. Testées sur cinq parcelles durant trois cycles de culture, les formulations ont montré une réduction significative des symptômes de jaunissement des feuilles et des taches brunes, avec une diminution de 50% des feuilles jaunies et de 43 à 67,6% des taches brunes par rapport aux parcelles non amendées. En outre, les rendements en grain et en paille ont augmenté grâce à une réduction des talles infertiles et de la stérilité des panicules. Sur la dynamique du fer, les amendements ont réduit les fractions de fer hydrosoluble, échangeable, acido-soluble et biodisponible, contribuant à de meilleurs rendements et à une réduction de la toxicité ferreuse. Le TSP, avec sa solubilité rapide, s'est avéré efficace à court terme, mais ses effets ont diminué avec le temps. En revanche, la RP, avec sa libération lente du phosphore, a maintenu des rendements stables et réduit les symptômes de toxicité. Ces résultats montrent l'importance de choisir la forme de phosphore adaptée aux conditions du sol pour optimiser la productivité du riz à long terme.

MOTS-CLEFS: toxicité ferreuse, taches brunes, jaunissement des feuilles, Formes du fer, sols acides, amendement, fer biodisponible.

1 INTRODUCTION

Dans la plupart des sols tropicaux, les deux tiers des surfaces rizières sont situés sur des sols ferralitiques fortement désaturés (Hyperdystric Ferralsol), caractérisés par une acidité marquée [1]. Cette acidité entrave considérablement l'absorption des éléments minéraux essentiels,

notamment le phosphore, dont la disponibilité pour les plantes est réduite en raison de son immobilisation par les oxydes de fer (Fe) et d'aluminium (Al) [2, 3]. Pour remédier à cette contrainte, l'apport d'engrais phosphatés dans ces sols acides est crucial pour améliorer les rendements agricoles [2,4,5]. Cependant, l'application de phosphore peut provoquer une remobilisation des ions métalliques, en particulier du fer et de l'aluminium, avec des effets complexes sur la dynamique des nutriments dans le sol [6]. Dans les rizières de bas-fonds, souvent inondées temporairement, la sorption du phosphore par les oxydes de fer peut devenir réversible en conditions anaérobies, telles que celles observées après une inondation [3]. Ce phénomène peut non seulement réduire la disponibilité du phosphore pour les cultures, mais aussi augmenter la concentration en fer ferreux (Fe²⁺) dans le sol [7]. Une présence excessive de fer ferreux peut induire un déséquilibre en éléments minéraux chez le riz, entraînant des conditions de toxicité ferrique qui compromettent la santé des cultures et réduisent la productivité des parcelles rizicoles [8, 9]. Le fer ferreux, absorbé en grande quantité par les plantes, peut s'accumuler dans les feuilles, provoquant une décoloration des limbes, une réduction du tallage et de la taille des plants, et entraînant une baisse significative des rendements [7,10]. De plus, dans les sols acides, un excès de fer est souvent observé, perturbant l'assimilation des nutriments essentiels, notamment le phosphore et le potassium [11].

Ainsi, une meilleure compréhension des interactions entre les amendements phosphatés et la dynamique du fer dans les sols acides est essentielle pour optimiser les pratiques agricoles dans les régions tropicales, en particulier dans le Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, où ces problématiques sont fréquemment rencontrées. C'est dans ce contexte, que des amendements phosphatés, composés de différentes proportions de roche phosphatée du Maroc (RP) et de fertilisants phosphatés chimiques solubles, tels que le Triple Superphosphate (TSP) et le NPK, ont été introduits pour limiter la baisse du pH des sols et améliorer la nutrition phosphatée en riziculture dans la région du Centre-Ouest, spécifiquement à Gagnoa. Cette étude vise à évaluer l'impact de ces amendements phosphatés sur la dynamique du fer dans les parcelles rizicoles acides de Gagnoa, où des problèmes de toxicité ferrique ont été observés.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 SITES D'ÉTUDE

Notre étude a été réalisée dans la région du Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, précisément à Gagnoa (6°07'54"N, 5°57'02"O), qui bénéficie d'un climat tropical et possède des sols classés en Ferralsol Dystric [2]. Cinq parcelles rizicoles villageoises de bas-fond, où des problèmes de toxicité ferreuse ont été constatés, ont été sélectionnées à Gagnoa au Centre de la Côte d'Ivoire: station de CNRA (06°08'2.0"N, 05°53'49.5"W), Zapata 1 (06°06'10.8"N, 05°56'6.4"W), Zapata 3 (06°06'20.8"N, 05°56'34.6"W), Lalane (06°04'55.0"N, 05°55'20.0"W), et campement Zoro (06°05'13.2"N, 05°55'8.6"W), en considérant chaque parcelle comme une répétition.

Des échantillons de sols ont été prélevés à la tarière à une profondeur de 0-20 cm sur chaque parcelle suivant leurs diagonales et mélangés pour obtenir un échantillon composite par parcelle. L'échantillon composite obtenu est ensuite tamisé à 2 mm et séché à l'air libre pour la caractérisation physico-chimique avant la mise en place de l'expérimentation.

2.2 MATÉRIEL

2.2.1 MATÉRIEL VÉGÉTAL

La variété de riz utilisée est WITA 9 et a été fournie par le Centre National de Recherche Agronomique (CNRA) de Man. Elle a un cycle de 120 Jours, un rendement moyen de 6 t.ha⁻¹ avec un rendement potentiel de 10 t.ha⁻¹. Les caractéristiques de la variété WITA 9 sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques de la variété de riz WITA 9

Paramètres	
Hauteur (cm)	92 cm
Talles/m2	205
Durée 50 % floraison (jour)	80 à 85
Rendement moyen	6 t.ha ⁻¹
Rendement potentiel	10 t.ha ⁻¹
Forme des grains	3,5 g
Toxicité ferreuse	Sensible
Poids 1000 grains	23,6 g
Parents génétiques	IR 2042-178-1 × CT 19

2.2.2 FERTILISANTS

La roche phosphatée (RP) utilisée provient du Maroc et a été fournie par l'OCP-Africa (Office Chérifien des Phosphates). Sa composition chimique est donnée dans le Tableau 2. Le TSP (Triple Superphosphate) a été fourni également par l'OCP-Africa et contient 30% de P_2O_5 . Le NPK 15/15/15 et l'Urée 46% N ont été achetés sur le marché local et apportés respectivement à la dose de 100 kg ha⁻¹ comme fumure d'entretien, et de 200 kg.ha⁻¹ comme fumure de fond dans chaque parcelle.

Tableau 2. Caractéristiques chimiques de la roche phosphatée (RP) utilisée

Éléments chimiques	Teneur (%)
P ₂ O ₅	30
CO ₂	6,4
SO ₃	1,3
CaO	49,6
MgO	1,2
Fe ₂ O ₃	0,2
Al ₂ O ₃	0,2
F ₂ O	2,2
H ₂ O	2,1
SiO ₂	6,6

2.3 CONDUITE DES ESSAIS

L'expérimentation a été réalisée dans les cinq parcelles différentes de 200 m² de surface utile subdivisées en huit microparcelles de 25 m² où chaque microparcelle représente un traitement., dans un dispositif en blocs complètement randomisés. Six différents amendements phosphatés, résultant de la combinaison de roche phosphatée (RP) et de triple superphosphate (TSP), ont été apportés à la dose totale de 90 kg P₂O₅. ha⁻¹ soit 300 kg.ha⁻¹ de TSP et/ou RP avant le semis et qu'au début du premier cycle. Il s'agit des combinaisons 100% RP et 0% TSP (T1); 90% RP et 10% TSP (T2); 80% RP et 20% TSP (T3), 40% RP et 60% TSP (T4); 20% RP et 80% TSP (T5); 0% RP et 100% TSP (T6) (Tableau 2). A ces combinaisons s'ajoutent le témoin absolu (T0a, sans engrais) et la pratique paysanne (T0, NPK + Urée). Au total, l'essai comporte huit traitements 100% RP et 0% TSP (T1); 90% RP et 10% TSP (T2); 80% RP et 20% TSP (T3), 40% RP et 60%TSP (T4); 20% RP et 80% TSP (T5); 0% RP et 100% TSP (T6); Témoin sans engrais (T0a) et la pratique paysanne (T0, NPK). Le NPK 15-15-15 et l'Urée à 46% N ont été apportés en raison de 200 kg.ha⁻¹ et 100 kg.ha⁻¹ comme fumure de fond et fumure d'entretien respectivement pour chaque micro-parcelle sauf pour le témoin absolu.

2.4 COLLECTE DES DONNÉES

2.4.1 OBSERVATION MACROSCOPIQUE DE LA TOXICITE FERREUSE DES BAS-FONDS À L'ÉPIAISON FLORAISON

Pour évaluer la toxicité du fer sur l'état des plants de riz, les feuilles ont été examinées pour y suivre l'apparition éventuelle du symptôme de brunissement (Jaunissement des feuilles) entre le 29^{ème} et le 37^{ème} après repiquage (JAR), dans chaque parcelle et sous les différents traitements. Les symptômes foliaires ont été évalués selon le système de notation des feuilles fournies par le réseau international pour l'évaluation génétique du riz [12, 13]. Ce système de notation de la toxicité ferreuse est représenté dans le tableau 3. L'observation des tâches et de la couleur des feuilles a été effectuée trois fois dans l'intervalle indiqué afin d'avoir une moyenne à l'aide d'une plaquette couleur source selon la méthode décrite par [13].

Tableau 3. Score des symptômes foliaires en fonction des dommages dus à la toxicité ferreuse

Pourcentage des feuilles affectées	Score
0	0
1-9	1
10-29	3
30-49	5
50-69	7
70-89	9
90-100	10 (feuilles mortes)

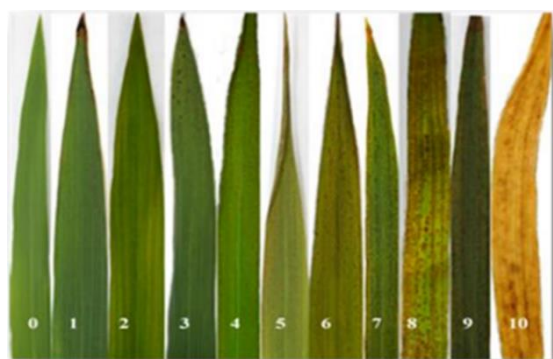


Fig. 1. Score des symptômes foliaires modifié adapté par [13]

2.4.2 PARAMETRES AGRONOMIQUES (RENDEMENT, TAUX DE TALLES INFERTILES ET TAUX DE STERILITE)

A la récolte, on a procédé au comptage des poquets, talles et panicules du carré de rendement. Ce qui a permis de déterminer le nombre de talles au mètre carré (TalT), le nombre de panicules au mètre carré (Pan) et le taux de talles infertiles (Infer).

$$Infer = \frac{TalT - Pan}{TalT} \times 100 [1]$$

De même, le nombre total d'épillets par panicule (EPIL) et d'épillets vides par panicule (EPV), et le taux de stérilité (STERIL) a été calculé comme suit:

$$Steril = 100 \times EPV / EPIL [2]$$

La biomasse, composée des panicules, des tiges et des feuilles, a été collectée dans chaque carré de rendement, séchée à l'air libre puis pesée pour déterminer le rendement en paille (RDP) par m². Le rendement en grains (RDG) a été déterminée après séchage des grains à l'air libre puis à l'étuve à 65°C durant 72 heures. Le rendement grain (RDG) a été calculé en ramenant les poids des grains à 14% d'humidité selon la formule ci-dessous:

$$RDG (14\%) = \frac{P1 (100 - h1)}{100 - 14} [3]$$

À la fin du troisième cycle de culture, des échantillons de sol ont été prélevés selon les traitements appliqués dans chaque parcelle, tamisés à 2 mm et séchés à l'air libre. Les échantillons de sol de chaque parcelle ont ensuite été regroupés par traitement pour constituer un échantillon composite, destiné à la détermination des différentes fractions de fer présentes dans les sols, suite aux traitements appliqués."

2.4.3 DETERMINATION DES DIFFERENTES FRACTIONS DU FER DANS LE SOL

La détermination des différentes fractions de fer a été effectuée sur une même prise de 1g de sol. Les fractions observées sont la fraction hydrosoluble, extraite par l'eau pure; la fraction échangeable, extraite par KCl (0,1M); la fraction acido-soluble, extraite par HCl (0,5N); la fraction réductible liée aux oxydes de fer mal cristallisés (Ox Tamm), extraite par 25ml 10,92 g/l C₂O₄H₂ 2H₂O + 16,11 g/l C₂O₄ (NH₄)₂ H₂O; la fraction réductible liée aux oxydes de fer bien cristallisés (Ox CBD), extrait par: 25ml de 78,4 g/l Na₂-citrate+9.34g/l NaHCO₃ et Na₂S₂O₄. La fraction oxydable liée à la matière organique (Ox py) a été déterminée hors séquence sur une autre prise de 1g de sol par 25 ml Na₂P₂O₇ 10H₂O (0,1M) (Tableau 4).

La fraction de fer biodisponible, composée du fer hydrosoluble (Fe Hydro) et du fer échangeable (Fe Ech), qui représente la portion constamment accessible à la plante, a été évaluée. Par la suite, la fraction de fer moins biodisponible, incluant le fer acidosoluble (Fe Acido) et le fer associé à la matière organique (Fe MO), a été déterminée. Enfin, la fraction de fer non biodisponible, comprenant le fer lié aux oxydes de fer mal cristallisés (Fe Tamm) et le fer lié aux oxydes de fer bien cristallisés (Fe CBD), a également été estimée.

La teneur en fer total des échantillons de sol a été déterminée après fusion alcaline, selon le protocole décrit par [14] et dosé par spectrométrie d'émission plasma (ICP-AES), Jobin Yvon 2038.

Tableau 4. Protocole d'extraction séquentielle réalisée sur les échantillons de sol pour 100 mg de sol sec

Étapes	Fractions	Réactifs	Volume du réactif	Conditions
1	Hydrosoluble (Hydro)	Eau distillée	25 ml	1h d'agitation rotative, 30 min Centrifugation à 7500 tr/mn
2	Échangeable (Ech)	KCl (0,1M)	25 ml	1h d'agitation rotative, 30 mn centrifugation à 7500 tr/mn
3	Acido-soluble (Acido)	HCl (0,5N)	25 ml	1h d'agitation rotative, 5 min centrifugation à 2400 tr/min
4	Réductible (Ox Tamm)	10,92g ^l ⁻¹ C2O4H2, 2H2O + 16,11g ^l ⁻¹ C2O4(NH4)2, H2O	25ml	4 h d'agitation rotative, 30min centrifugation à 7500 tr/min
5	Réductible (OxCBD)	78,4g ^l ⁻¹ Na2citrate + 9.34g ^l NaHCO3 et Na2 S2O4	25ml	30 min d'agitation rotative, 30 min centrifugation 7500 tr/min
Hors de la séquence	Fer total (Ox py)	25ml Na2P2O7 10H2O (0,1M).	25ml	16 h d'agitation rotative, 30 min de centrifugation à 18000 tr/min

2.5 ANALYSES STATISTIQUES

La significativité des différents traitements sur les différents paramètres agronomiques du riz a été faite selon le test de Student Newman-Keuls (SNK) à l'aide du logiciel SAS. Le test de Student Newman Keuls (SNK) a servi également pour la comparaison des proportions moyennes de fer des différentes formes de fer dans le sol selon la méthode de la plus petite différence significative (ppds) au seuil de significativité de 5%.

3 RÉSULTATS

3.1 CARACTERISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES ET MICROBIOLOGIQUES DES SOLS DES PARCELLES ÉTUDIÉES

3.1.1 CARACTÉRISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES

La caractérisation des sols des cinq parcelles étudiées montre qu'ils ont une texture sablo-argilo-limoneuse (station de CNRA, et Campement Zoro) à sablo-limono-argileuse (Zapata 1, Zapata 3 et Lalane) avec 67 à 75,3% de sable, 11,2 à 19,4 % limons et 11 à 20,4 % d'argile. (Tableau 5). Quelle que soit les parcelles étudiées, les sols sont pauvres en N (1 à 2 g.kg⁻¹ sol sec), en C (10 à 27 g.kg⁻¹ sol sec) et en matière organique (20 à 54 g.kg⁻¹ sol sec) avec un rapport C/N compris entre 10 e 13,5 (Tableau 5).

A l'exception de la parcelle de la station de CNRA (242,3 mg de P_{total}.kg⁻¹sol sec et 32,2 mg de P_{ass}.kg⁻¹sol sec), les sols ont une teneur en phosphore total faible allant de 40,7 à 89,4 mg de P_{total}.kg⁻¹sol sec et de 2 à 8,2 mg de P_{ass}.kg⁻¹sol sec (Tableau 5). Quelle que soit les parcelles étudiées, les sols sont acides avec des pH compris entre 4,92<pH_{eau} <5,8 et entre 3,7<pH_{KCl} <4,9), ont une faible teneur en K⁺ (0,38 à 0,42 mmol⁺.kg⁻¹), Ca²⁺ (2,06 à 4,53 mmol⁺.kg⁻¹), Al³⁺ (0,1 à 0,45 mmol⁺.kg⁻¹), Fe²⁺ (293,5 à 580,9 mmol⁺.kg⁻¹), Mg²⁺ (0,73 à 1,9 mmol⁺.kg⁻¹), et Na⁺ (0,08 à 0,27 mmol⁺.kg⁻¹). La capacité d'échange cationique (CEC) des sols varie de 3,8 à 5,4 mmol⁺.kg⁻¹

3.1.2 DENOMBREMENT DES BACTERIES /G DE SOL SEC

L'étude du nombre de microorganismes totaux (MT) et celui des solubilisateurs du phosphore (MSP) a indiqué qu'il y a significativement plus de MT à P < 0.001 sur les sites de Zapata 1 et 3 (3550 à 3577 x 10⁴ bactéries/g sol sec) que sur les sites de Zorro (3001 x 10⁴ bactéries/g sol sec), Lalane (2360 x 10⁴ bactéries/g sol sec) et de la station de CNRA (1588 x 10⁴ bactéries/g sol sec) (Tableau 6). Quant au nombre de bactéries solubilisatrice des phosphates (MSP), les résultats montrent qu'il y a significativement plus de MSP à P < 0.001 sur les sites de Zapata 1 et 3 (705 à 708 x 10⁴ bactéries/g sol sec) que sur les sites de Zorro (591 x 10⁴ bactéries/g sol sec), Lalane (460 x 10⁴ bactéries/g sol sec) et de la station de CNRA (284 x 10⁴ bactéries/g sol sec) (Tableau 6).

Tableau 5. Dénombrement microbien (nombre de microorganismes 10^4 /g de sol sec): microorganisme totales (MT) et microorganismes solubilisateurs de phosphore (MSP)

Sites	MT	MSP
Station	1588 ± 40 ^d	284 ± 24 ^d
Zapata 1	3577 ± 89 ^a	705 ± 86 ^a
Zapata 3	3550 ± 33 ^a	708 ± 76 ^a
Lalane	2360 ± 60 ^c	460 ± 55 ^c
Zorro	3001 ± 15 ^b	591 ± 34 ^b
Pr	0.001	0.001

Tableau 6. Caractéristiques physico-chimiques des sols dans la strate 0 - 20 cm avant expérimentation

Paramètres	SITES				
	Station	Zapata 3	Lalane	Campement Zoro	Zapata 1
Argile (%)	13,50	11,00	16,00	20,4	12,00
Limon (%)	11,20	15,00	17,00	14,3	19,40
Sable (%)	75,30	74,00	67,00	65,30	68,60
N (%)	0,10	0,10	0,20	0,13	0,12
C (%)	1,20	1,00	2,70	1,50	1,34
C/N	12,00	10,00	13,5	11,54	11,2
MO (%)	2,40	2,00	5,4	3,00	2,68
P (ass) mg/kg sol sec	32,20	8,2	7,00	2,80	3,6
P (tot) mg/kg sol sec	242,3	73,30	89,40	40,70	68,10
K ⁺ (cmol kg ⁻¹ sol sec)	0,32	0,28	0,42	0,31	0,38
Na ⁺ (cmol kg ⁻¹ sol sec)	0,08	0,10	0,08	0,10	0,27
Ca ²⁺ (cmol kg ⁻¹ sol sec)	2,12	3,67	4,23	2,06	4,53
Mg ²⁺ (cmol kg ⁻¹ sol sec)	0,73	1,5	0,94	1,04	1,46
Al ³⁺ (cmol kg ⁻¹ sol sec)	0,26	0,12	0,35	0,45	0,10
Fe ²⁺ (ppm) mg/kg sol sec	410,35	400,00	580,90	809,70	293,50
Fe (ppm) mg/kg sol sec	4182	3200	3850	3780	2909
pHeau	4,92	5,83	5,5	5,70	5,8
pKCl	3,7	4,6	4,4	4,3	4,9
CEC (cmol kg ⁻¹)	3,2	3,7	5,3	3,7	5,4

3.2 OBSERVATION MACROSCOPIQUE DE LA TOXICITE FERREUSE DURANT L'ÉPIAISON-FLORAISON DES PLANTS DE RIZ DANS LES PARCELLES EXPERIMENTALES

3.2.1 JAUNISSEMENT ET BRUNISSEMENT DES FEUILLES DURANT L'ÉPIAISON-FLORAISON DES PLANTS DE RIZ DANS LES PARCELLES EXPERIMENTALES

L'observation macroscopique de la toxicité ferreuse durant la période allant de l'épiaison à la floraison dans les casiers rizicoles a révélé la présence de taches brunes et un jaunissement des feuilles. L'évaluation du pourcentage de jaunissement et des taches brunes a montré globalement une réduction de ces symptômes dans les traitements amendés (T1, T2, T3, T4, T5 et T6) avec 31 à 37,7% de feuilles jaunies et 14,11 à 32,09% de taches brunes, quel que soit le cycle de culture, comparativement aux traitements non amendés (T0 et T0a) avec 73,44 à 92,8% de feuilles jaunies et 43,6 à 56,7 % de taches brunes (Tableau 7).

Plus spécifiquement, sous les traitements non amendés (T0 et T0 ab), on assiste à une augmentation de 5,6 à 30,8 % du taux de jaunissement des feuilles au cours des cycles de culture qui est passé de 65 à 90 % de feuilles jaunies au cycle 1 à 85 à 95 % de feuilles jaunies au cycle 3 (Tableau 7). Pour les traitements amendés avec une forte teneur en roche phosphatée (RP) c'est-à-dire sous les traitements T1, T2, T3 et T4, on assiste à une diminution de 23 à 42,8 % du taux de jaunissement des feuilles au cours des cycles de culture, passant de 38,33 à 46,7 % de feuilles jaunies au cycle 1 à 22,7 à 31,7 % de feuilles jaunies au cycle 3. En revanche, sous les traitements amendés avec forte teneur en Triple superphosphate (TSP) c'est-à-dire T5 et T6, on observe une augmentation de 40 à 428 % du taux de jaunissement des feuilles au cours des cycles de culture, passant de 11,66 à 25 % de feuilles jaunies au cycle 1 à 35 à 61,66 % de feuilles jaunies au cycle 3 (Tableau 7).

Concernant les taches brunes, sous les traitements non amendés (T0 et T0 ab), on assiste à une augmentation du taux de brunissement des feuilles de 4 à 19,37 % au cours des cycles de culture allant de 42,52 à 51,1 % de taches brunes au cycle 1 à 44,3 à 56,7 % de taches brunes au cycle 3 (Tableau 7). Pour les traitements amendés, avec une forte teneur en roche phosphatée (RP) c'est-à-dire sous les traitements T1, T2, T3 et T4, on assiste à une diminution du taux de brunissement des feuilles de 36,9 à 44,2 % au cours des cycles de culture, passant de 21,02 à 25,37

% de taches brunes au cycle 1 à 9,33 à 15,7 % de taches brunes au cycle 3 (Tableau 7). En revanche, sous les traitements amendés avec une forte teneur en Triple superphosphate (TSP) c'est-à-dire T5 et T6, on observe une augmentation du taux de brunissement des feuilles de 62,1 à 103 % au cours des cycles de culture, passant de 17,87 à 23,2 % de taches brunes au cycle 1 à 36,3 à 37,6 % de taches brunes au cycle 3 (Tableau 7).

3.2.2 EVALUATION DU SCORE DES SYMPTOMES FOLIAIRES DE LA TOXICITE FERREUSE

Dans l'ensemble, l'évaluation du score de toxicité ferreuse indique un score plus faible sur les traitements amendés (7,67 à 5,93), comparativement à ceux non amendés dont le score de toxicité varie entre 7,8 et 7,9 (Tableau 8). L'évaluation du score de la toxicité ferreuse montre une réduction significative du score de la toxicité du cycle 1 au cycle 3 pour les traitements riches en roche phosphatée (RP) c'est-à-dire T1, T2, T3 et T4 passant de 7,8 à 8 au cycle 1 à 7 à 4 au cycle 3 (Tableau 8). En revanche, pour les traitements pauvres en RP mais plutôt riche en triple superphosphate (TSP), c'est à dire sous les traitements T5 et T6, on constate une augmentation du score de la toxicité ferreuse passant de 4,8 à 6,4 au cycle 1 à 7,4 à 7,8 au cycle 3 (Tableau 8).

Tableau 7. Score des symptômes foliaires de la toxicité ferreuse

cycles	To	Toa	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Cycle 1	7,6a	8a	8a	8a	8a	7,8a	6,4c	4,8b
Cycle 2	7,8a	7,4a	6,2b	7b	8a	5,8b	7b	7a
Cycle 3	8,4a	8a	4c	5,4c	7b	4,2c	7,8a	7,4a
MG	7,93	7,8	6,07	6,8	7,67	5,93	7,07	6,40
CV	8,29	9,93	7,96	7,59	7,51	7,53	5,77	6,38
P > F	0,178	0,396	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,001	<0,0001

Les valeurs dans la même colonne, suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman-Keuls $p < 0,05$.

Sur la figure 2, on note, dans l'ensemble, une réduction des taches brunes, symptômes liés à la toxicité ferreuse, de 50 % pour les parcelles ayant reçu l'amendement phosphatés par rapport à celles non amendées (témoins: T0 et T0a). De même, on observe une réduction du jaunissement des feuilles de 46 % pour les parcelles ayant reçu l'amendement phosphatés par rapport à celles non amendées (témoins: T0 et T0a).

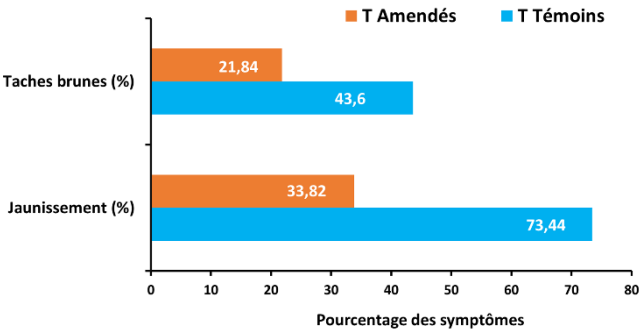


Fig. 2. Effet des amendements phosphatés sur les symptômes (taches brunes, jaunissement des feuilles) de la toxicité ferreuse

3.3 EFFET DES AMENDEMENTS PHOSPHATES SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES (RENDEMENT, TAUX DE TALLES INFERTILES ET TAUX DE STERILITE) DU RIZ IRRIGUE

3.3.1 RENDEMENT EN GRAIN ET EN PAILLE

Le tableau 9 présente les rendements en grain (RDG) et en paille (RDP) moyens du riz irrigué en fonction des amendements phosphatés. On note des différences très hautement significatives ($p < 0,0001$) entre les valeurs moyennes obtenues sous les sols amendés (T1, T2, T3, T4, T5, T6) et celles sous les sols non amendés (T0a et T0). Aussi, quelle que soit le cycle de culture, les rendements RDG et RDP, sont-ils significativement plus élevés lorsque l'amendement phosphaté est riche en RP (40 à 100% RP), c'est-à-dire sous les traitements T3, T4, T2 et T1 (Tableau 8) où on note 4,28 à 7,62 t.ha⁻¹ pour RDG et 4,44 à 6,32 t.ha⁻¹ pour RDP (Tableau 9). De plus, on assiste à une augmentation signification des rendements RDG et RDP du cycle 1 au cycle 3 sous les traitements riches en roche phosphatée (T1, T2, T3, T4). Les rendements RDP moyens varient entre 4,53 à 6,24 t.ha⁻¹ au cycle 1 et entre 6,94 à 8,93 t.ha⁻¹ au cycle 3. Les rendements en grain RDG passent de 4,69 à 6,43 t.ha⁻¹ au cycle 1 à 7,03 à 10,2 t.ha⁻¹ au cycle 3. Cependant, lorsque l'amendement phosphaté est riche en TSP, on assiste à une diminution significative des RDG et RDP du cycle 1 (5,61 à 6,06 t.ha⁻¹ pour RDP et 5,84 à 6,62 t.ha⁻¹ pour RDG) au cycle 3 (3,01 à 2,46 pour RDP et 2,31 à 2,73 t.ha⁻¹).

Tableau 8. Observation macroscopique (jaunissement et brunissement des feuilles de la toxicité ferreuse (%))

Traitements	Jaunissement des feuilles				Brunissement des feuilles			
	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Moyenne	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Moy
T0ab	90 ^a	93,33 ^a	95 ^a	92,8 ^a	51,11 ^a	58 ^a	61 ^a	56,7 ^a
T0	65 ^b	70,33 ^b	85 ^b	73,44 ^b	42,52 ^b	44 ^b	44,3 ^b	43,6 ^b
T1	46,7 ^c	39 ^c	26,7 ^e	37,46 ^c	24,3 ^c	19 ^d	15,33	19,54 ^e
T2	41,66 ^c	40 ^c	31,7 ^d	37,78 ^c	21,02 ^c	12 ^d	9,33 ^e	14,11 ^e
T3	39 ^d	36 ^c	25,7 ^e	33,56 ^c	25,37 ^c	18 ^d	15,66 ^d	19,66 ^e
T4	38,33 ^d	28 ^d	22,7 ^e	29,67 ^d	22,7 ^c	15 ^d	12,66 ^d	16,78 ^e
T5	25 ^e	33 ^c	35 ^d	31 ^c	23,2 ^c	35,3 ^c	37,6 ^c	32,03 ^c
T6	11,66 ^f	27 ^d	61,66 ^c	33,44 ^c	17,87 ^d	32,6 ^c	36,3 ^c	28,92 ^d
Pr > F	<0,001*	<0,01	<0,01	<0,001*	<0,01	<0,01	<0,01	<0,001*

Les valeurs dans la même colonne, suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman-Keuls $p < 0,05$. * hautement significatif au seuil de $p < 0,05$

3.3.2 TAUX DE STÉRILITÉ (STERIL) (INFER) ET TAUX DE TALLES INFERTILES

Dans l'ensemble, nos résultats montrent un taux de stérilité plus élevé sur les parcelles non amendées, avec un taux moyen de 24,45 % pour T0 et de 36,88 % pour T0a, par rapport aux parcelles amendées (T1, T2, T3, T4, T5, T6), dont les taux varient entre 7,29 % et 13,03 % (Tableau 10). À l'exception de T0 et T0a, l'arrière-effet des amendements phosphatés ont significativement influencé le taux de stérilité. En effet, on observe une diminution progressive de ce taux du cycle 1 au cycle 3 pour les traitements T1 (passant de 15,68 % au cycle 1 à 7,77 % au cycle 3), T2 (de 14,88 % à 11,99 %), T3 (de 14,55 % à 11,18 %) et T4 (de 13,22 % à 7,11 %). En revanche, une légère augmentation est constatée pour les traitements T5 (de 7,8 % à 9,26 %) et T6 (de 6,19 % à 8,91 %) (Tableau 10). Par ailleurs, le taux de stérilité des parcelles témoins non amendées (T0 et T0a) augmente également, passant respectivement de 23,45 % à 27,51 % pour T0 et de 34,3 % à 41,97 % pour T0a entre le cycle 1 et le cycle 3 (Tableau 10).

Le tableau 11 présente le taux de talles infertiles (Infer) après trois cycles de culture. Globalement, nos résultats révèlent un taux de talles infertiles plus élevé dans les parcelles non amendées, avec un taux moyen de 24,81 % pour T0 et de 40,92 % pour T0a, comparativement aux parcelles amendées (T1, T2, T3, T4, T5, T6), dont les taux varient entre 9,51 % et 17,86 % (Tableau 11). Par ailleurs, les résultats montrent que les amendements phosphatés ont eu un effet résiduel significatif sur la réduction des talles infertiles. En effet, on observe une diminution progressive du taux de talles infertiles du cycle 1 au cycle 3 pour les traitements T1, T2, T3 et T4, passant respectivement de 21,4 % à 13,54 %; de 13,71 % à 10,07 %; de 12,58 % à 9,96 %; et de 11,51 % à 7,69 % (Tableau 11). En revanche, pour les parcelles traitées avec T5 et T6, une augmentation du taux de talles infertiles est observée, passant de 9,8 % à 15,92 % pour T5 et de 9,34 % à 14,48 % pour T6 entre le cycle 1 et le cycle 3 (Tableau 11).

Tableau 9. Rendement moyen en grain (RDG) et en paille (RDP) sous les différents traitements après les trois cycles de culture

Traitements	RDP (t ha ⁻¹)				RDG (t ha ⁻¹)			
	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Moy	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Moyenne
T0a : -NPK	3,11d	2,57f	1,84e	2,51f	2,90e	2,38e	1,61e	2,30f
T0 : +NPK	4,08c	3,16f	2,91d	3,38e	3,60e	3,01e	2,84d	3,15e
T1 : 100%RP+NPK	4,83bc	5,06cd	6,94c	5,61c	4,69d	5,73c	7,26c	5,89c
T2 : 90%RP+10%TSP+NPK	4,93bc	5,68c	7,38bc	6,00bc	4,73d c	5,88c	7,03c	7,06b
T3 : 80%RP+20%TSP+NPK	5,51ab	6,81b	7,93b	6,75b	5,51c	7,08b	8,57b	7,06b
T4 : 60%RP+40%TSP+NPK	6,24a	7,68a	8,93a	7,62a	6,43ab	8,30a	10,24a	8,32a
T5 : 20%RP+80%TSP+NPK	5,61ab	4,44de	3,01d	4,36d	5,84bc	4,76d	2,73d	4,44d
T6 : 0%RP+100%TSP+NPK	6,06a	4,34e	2,46de	4,28d	6,62a	4,47d	2,31de	4,47d
Moy. G	5,05	4,97	5,18	5,06	5,04	5,20	5,32	5,19
CV (%)	17,08	12,03	17,59	25,15	13,25	14,44	13,24	26,64
Pr > F	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

Les valeurs dans la même colonne, suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman-Keuls $p < 0,05$. *** très hautement significatif au seuil de $p < 0,05$

Tableau 10. Taux de stérilité (stéril) paniculaire (%) au cours des trois cycles de culture

Traitements	Stéril Moyen (%)	Stéril (%) Cycle 1	Stéril (%) Cycle 2	Stéril Cycle 3
T0a	36,88a	34,30a*	34,38a*	41,97a**
T0	26,45b	23,20b*	28,65b*	27,51b*
T1	13,03c	15,68c*	15,64c*	7,77e**
T2	12,87c	14,88cd*	11,91d**	11,99c**
T3	12,54c	14,55d*	11,74d**	11,18c**
T4	9,03d	13,22e*	9,43e**	7,11e**
T5	8,83d	7,80f*	6,78f*	9,26d**
T6	7,29d	6,19g*	6,78f*	8,91d**
MG	15,87	16,23	15,66	15,71
CV	16,49	3,95	6,15	4,86
P> F	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

Les moyennes avec les mêmes lettres dans une même colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de $\alpha = 0,05$.

Les moyennes avec les mêmes signes (*, **, ***,...ou *****) sur une même ligne sont pas statistiquement différentes au seuil de $\alpha = 0,05$.

Tableau 11. Taux de talles infertiles (Infer, %) au cours des trois cycles de culture

Traitements	Infer Moyen	Infer Cycle 1	Infer Cycle 2	Infer Cycle 3
T0a	40,92 ^a	30,76 ^{a*}	41,92 ^{a**}	50,08 ^{a**}
T0	24,81 ^b	29,63 ^{a*}	22,95 ^{b**}	21,84 ^{b**}
T1	17,86 ^{bc}	21,40 ^{ab*}	18,63 ^{bc**}	13,54 ^{c***}
T2	12,10 ^c	13,71 ^{c*}	12,52 ^{c*}	10,07 ^{d**}
T3	11,31 ^c	12,58 ^{c*}	11,40 ^{c*}	9,96 ^{e**}
T4	9,51 ^d	11,51 ^{c*}	9,34 ^{d**}	7,69 ^{e***}
T5	12,50 ^c	9,80 ^{d*}	11,76 ^{c**}	15,92 ^{c***}
T6	11,28 ^c	9,34 ^{d*}	10,02 ^{c*}	14,48 ^{c**}
MG	17,54	17,34	17,32	17,95
CV	6,69	6,64	7,55	8,82
P> F	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

Les moyennes avec les mêmes lettres (a, b,...ou z) dans une même colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de $\alpha = 0,05$.

Les moyennes avec les mêmes signes (*, **, ***,...ou *****) sur une même ligne sont pas statistiquement différentes au seuil de $\alpha = 0,05$.

3.4 EFFETS DES AMENDEMENTS PHOSPHATES SUR LA DYNAMIQUE DU FER DANS LE SOL

3.4.1 EFFETS DES AMENDEMENTS PHOSPHATES SUR FRACTIONNEMENT DU FER APRES TROIS CYCLES DE CULTURE

L'étude de la dynamique du fer dans le sol montre que les fractions de fer liées aux oxydes de fer peu ou mal cristallisé, dit "fer amorphe" (Fe Tamm) et à la matière organique (Fe MO) sont en quantité importante que les fractions liées aux oxydes de fer bien cristallisées et peu solubles (Fe CBD), celles hydrosolubles (Fe Hydro), échangeables (Fe éch) et acido-solubles (Fe acido), quelle que soit le traitement appliqué et le cycle de culture (Figure 3). En outre, nos résultats indiquent des proportions moyennes plus importantes de Fe Hydro (3,12 à 4,59%), Fe Ech (2,80 à 4,88%), et Fe Acido (4,07 à 5,07%) pour les sols non amendés (T0 et T0a) que ceux amendés (T1, T2, T3, 4, T5, T6), avec respectivement 0,57 à 1,88%, 0,87 à 2,20% et 2,35 à 2,86% (Tableau 12). Ainsi, on assiste à une diminution des proportions des fractions de Fe hydrosolubles et échangeable après trois cycles de culture sous les parcelles amendées par rapport à celle non amendées (Figure 3), passant de 4,24 sous T0a à 0,63 % sous T6 au cycle 1; de 5,09 sous T0a à 0,99 sous T5% cycle 2 et de 4,43 sous T0a à 0,43 % sous T2 au cycle 3 (Figure 3).

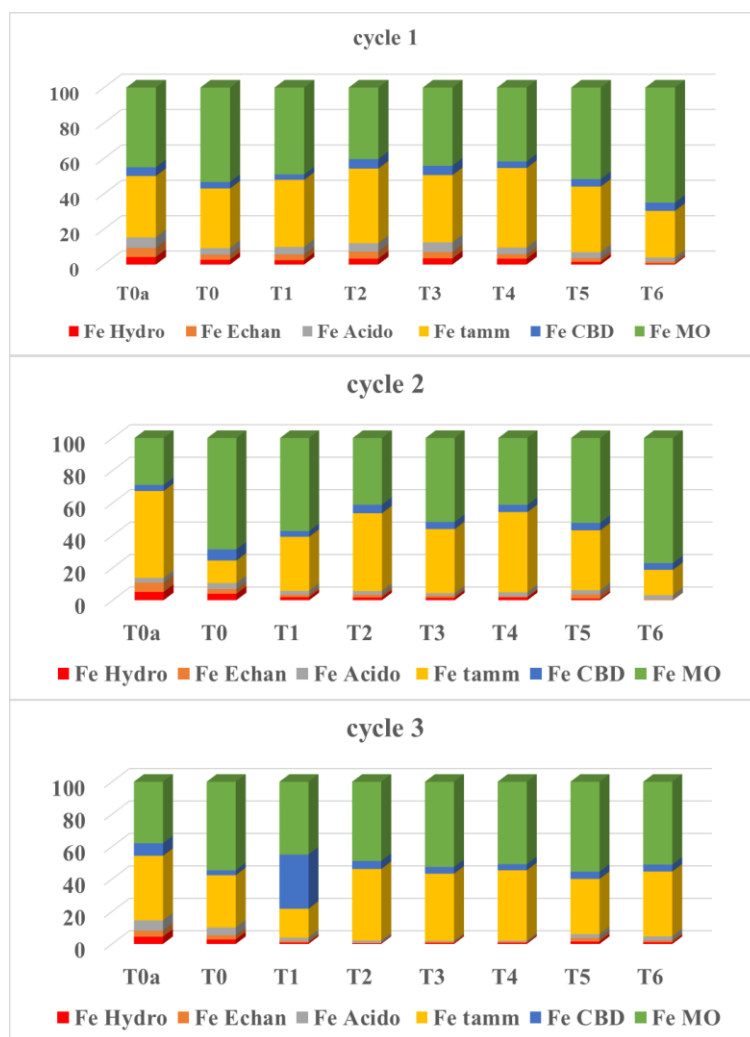


Fig. 3. Proportion (%) des différentes formes de fer dans les sols rizicoles sous différents traitements. Fe hydro: Fe hydrosoluble; Fe éch: Fe échangeable; Fe acido: Fe acido soluble; FeTamm: Fe liées aux oxydes de fer peu ou mal cristallisés; FeCBD: Fe liées aux oxydes de fer bien cristallisés et peu solubles; Fe MO: Fe liées à la matière organique

3.4.2 EFFET DES AMENDEMENTS PHOSPHATES (AP) SUR LA BIODISPONIBILITE DU FER DANS LES SOLS RIZICOLES

Sur la figure 4, les résultats montrent une réduction progression de la proportion de fer biodisponible du cycle 1 au cycle 3, plus particulièrement sous les sols amendés, comparativement aux sols non amendés. On assiste à une baisse du pourcentage en fer biodisponible passant de 9,48% sous T0 ou de 5,92% sous T0a à 3,14 à 3,75% sous T1 à T5 et à 1,44 sous T6 (Tableau 12). On note donc une diminution de 60 à 80% du pourcentage en fer biodisponible sous les sols amendés, comparativement aux sols n'ayant pas reçus d'AP (T0), avec une plus forte diminution lorsque l'amendement phosphaté (AP) est riche en triple super phosphate (TSP), c'est à dire sous les sols ayant reçu le traitement T6 (Tableau 12). Par contre, pour le fer peu biodisponible, les résultats indiquent une augmentation de la proportion de fer peu biodisponible suite à l'apport de de l'AP passant de 42,42% sous T0 à 46,31 à 66,9% sous les sols amendés (T1, T2, T3, T4, T5, T6), comparativement aux sols n'ayant pas reçus d'AP (T0). On constate donc une augmentation de 9 à 57% de la proportion de fer peu biodisponible suite à l'apport de l'AP, avec une plus forte augmentation sous les traitements T5 et T6 (Tableau 12). A l'exception des traitements T2 (49,93% de fer non biodisponible) et T4 (49,88% de fer non biodisponible), la proportion de fer non biodisponible passe de 48,11% sous T0 à 43% sous T1; 44,21% sous T2; 40,41% sous T5 et 31,66% sous T6 (Tableau 12), soit des diminutions de 9 à 34% de fer non biodisponible par rapport au témoin T0 (Tableau 12).

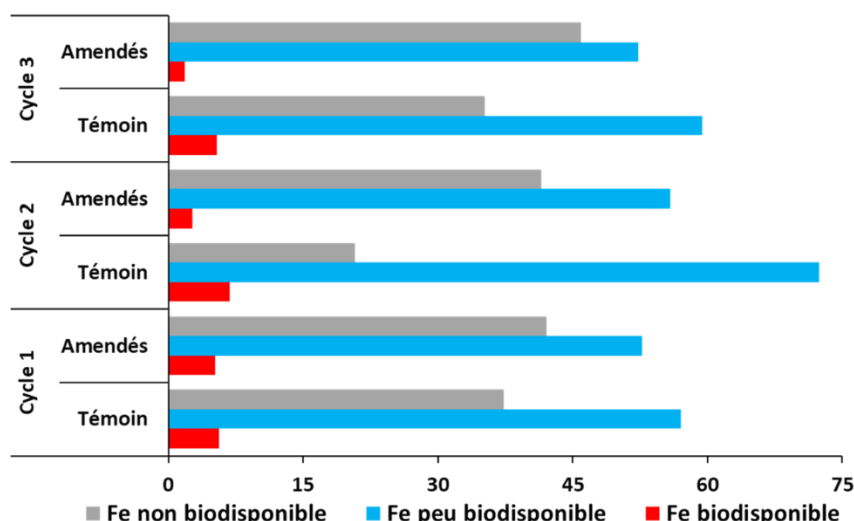


Fig. 4. Effet des amendements phosphatés sur la biodisponibilité du fer dans les sols rizicoles

Tableau 12. Proportion moyenne en fer (%) des différentes fractions de fer dans les sols rizicoles sous différents traitements. *Fe hydro: Fe hydrosoluble; Fe éch: Fe échangeable; Fe acido: Fe acido soluble; FeTamm: Fe liées aux oxydes de fer peu ou mal cristallisé; FeCBD: Fe liées aux oxydes de fer bien cristallisées et peu solubles; Fe MO: Fe liées à la matière organique; Fe bio: fer biodisponible; Fe peu bio: Fer peu biodisponible; Fe non bio: Fer non biodisponible*

Traitements	Fe Hydro	Fe Echan	Fe Acido	Fe Tamm	Fe CBD	Fe MO	Fe bio	Fe peu bio	Fe non bio
T0a : aucune fertilisation	3,12	2,80	4,07	26,63	4,47	58,91	5,92	62,98	31,10
T0 : témoin de référence	4,59	4,88	5,07	42,68	5,42	37,35	9,48	42,42	48,11
T1 : 100 % RP + 0 % TSP	1,74	1,91	2,86	29,70	13,30	50,48	3,65	53,35	43,00
T2 : 90 % RP + 10 % TSP	1,80	1,95	2,84	44,76	5,17	43,48	3,75	46,31	49,93
T3 : 80 % RP + 20 % TSP	1,88	1,83	2,56	39,64	4,57	49,52	3,71	52,08	44,21
T4 : 60 % RP + 40 % TSP	1,95	1,19	2,35	45,95	3,93	44,63	3,14	46,98	49,88
T5 : 20 % RP + 80 % TSP	1,35	2,20	2,84	36,01	4,40	53,19	3,56	56,03	40,41
T6 : 0 % RP+ 100 % TSP	0,57	0,87	2,47	27,35	4,32	64,43	1,44	66,90	31,66

Les valeurs dans la même colonne, suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman-Keuls $p < 0,05$.

4 DISCUSSION

4.1 ARRIERES EFFETS DES AMENDEMENTS PHOSPHATES (AP) SUR LES PARAMETRES AGRONOMIQUES DU RIZ DE BAS-FOND

Les amendements phosphatés (AP) à base de roche phosphatée naturelle du Maroc (RP) et/ou de Triple super phosphate (TSP) ont induit des différences significatives sur plusieurs paramètres agronomiques du riz, notamment les rendements en grain et en paille, ainsi que les taux de talles infertiles et de stérilité paniculaires.

Les résultats montrent que la fertilisation phosphatée favorise la croissance du riz en réduisant les taux de talles infertiles et de stérilité paniculaires, ce qui se traduit par une amélioration des rendements en grain et en paille. Nos observations indiquent que l'apport de phosphore stimule le tallage et la croissance des panicules dans les rizières de bas-fonds, contribuant ainsi à de meilleurs rendements en paille et en grain. Ces conclusions sont cohérentes avec celles de [15], et de [16] qui ont rapporté que des doses élevées d'azote réduisent le nombre de talles infertiles. Pour [17] et [15], cette réduction du nombre de talles infertiles et de panicules stériles peut être attribuée non seulement à la dose de phosphore apportée, mais aussi à la richesse en azote des sols (0,10 % N). L'interaction entre ces deux éléments permet non seulement une meilleure croissance en hauteur des plants de riz, mais aussi une augmentation de la production de talles fertiles et de panicules non stériles. En effet, la présence d'azote dans le sol favorise l'absorption du phosphore et le remplissage des grains [15, 17]. De plus, une augmentation du développement végétatif du riz a été observée lors d'une fertilisation combinée en phosphore et azote [15].

Les essais menés avec différents amendements phosphatés ont montré que plus la proportion de roche phosphatée est élevée dans l'amendement (T1, T2, T3, T4), plus les taux de talles infertiles et de panicules stériles diminuent. De même, un enrichissement de l'amendement en triple super phosphate entraîne également une réduction des taux de talles infertiles et de panicules stériles. Ces résultats indiquent que, quelle que soit la source de phosphore dans l'amendement, la fertilisation phosphatée contribue à réduire de manière significative le nombre

de talles stériles et de panicules infertiles. Ainsi, une augmentation de la dose de phosphore entraîne une baisse du taux de stérilité du riz. Ces observations corroborent les résultats obtenus par [18] et [19]. De même, [20] ont constaté une réduction de la stérilité des panicules chez diverses variétés de riz en utilisant des doses croissantes de phosphore. [21] ont également affirmé que l'apport en phosphore diminue la production de fleurs stériles sur les plants de riz. Ces résultats suggèrent que la formation des talles et des panicules est directement liée à la disponibilité du phosphore dans le sol, de manière similaire à l'effet de l'azote, comme le mentionne [16]. Selon [5], ce développement abondant des talles et des panicules favorisera une augmentation des rendements. Toutefois, l'effet résiduel des amendements phosphatés (AP) a révélé une diminution des taux de talles infertiles et de panicules stériles, ainsi qu'une augmentation des rendements en grain et en paille du cycle 1 au cycle 3, lorsque l'AP est riche en roche phosphatée (RP). En revanche, lorsque l'AP est principalement composé de triple super phosphate (TSP), on observe une augmentation des taux de talles infertiles et de panicules stériles, accompagnée d'une baisse des rendements au fil des cycles. Cette différence semble liée à la nature du phosphore présent dans l'AP (RP ou TSP). Le triple super phosphate (TSP) est un fertilisant inorganique très soluble et rapidement assimilable par la plante. Cette forte solubilité peut entraîner une diminution progressive du phosphore disponible dans le sol au fil des années. Une réduction du phosphore disponible affecte l'assimilation de l'azote, ce qui peut freiner la croissance végétative du riz, augmentant ainsi le nombre de talles infertiles et de panicules stériles, comme l'ont démontré [22], ainsi que [2,4,5,15]. Par ailleurs, cette réduction entraîne une baisse de la production de matière sèche et des rendements en grain. En revanche, la roche phosphatée est un matériau naturel dont la dissolution est plus lente, produisant un effet résiduel à long terme, comme l'ont indiqué plusieurs études [2,4,5,15]. En effet, l'application d'engrais phosphatés solubles, tels que le TSP, libère rapidement du phosphore, tandis que la RP le libère de manière progressive, étendant ses effets bénéfiques sur plusieurs années [23, 24, 25, 5]. Ces résultats corroborent les travaux de [4] Koné et al. (2010), qui ont observé une augmentation des rendements sous des traitements à base de RP comparativement au TSP dans les rizières des zones de forêt semi-montagneuse de Côte d'Ivoire. De plus, les recherches de [17], qui ont testé les réponses de différentes variétés de riz à des doses croissantes de RP et de TSP, aboutissent à des conclusions similaires.

4.2 ARRIERES EFFETS DES AMENDEMENTS PHOSPHATES (AP) SUR LA MANIFESTATION DE LA TOXICITE FERREUSE CHEZ LE RIZ DE BAS FOND

Les résultats de l'observation macroscopique des symptômes de toxicité ferreuse sur le riz de bas-fond révèlent, chez les plantes n'ayant pas reçu d'amendement phosphaté (AP), une augmentation des taches brunes et du jaunissement des feuilles du cycle 1 au cycle 3. Cette aggravation de la toxicité ferreuse sur les feuilles de riz en absence d'AP pourrait être due à l'acidité des sols, qui affichent un pH compris entre 4,9 et 5,8, à la saturation en eau, ainsi qu'à la faible disponibilité en phosphore (moins de 32 mg/kg de P). En effet, la toxicité ferreuse est un désordre nutritionnel fréquemment observé dans les sols saturés en eau avec des concentrations en fer excédant 300 mg/kg [26]. La déficience en phosphore entraîne un déséquilibre nutritionnel chez le riz, conduisant à une absorption excessive de fer ferreux (Fe^{2+}), qui se trouve sous forme soluble dans le sol, provoquant ainsi une toxicité ferreuse [27].

Les résultats ont également révélé une augmentation des taches brunes et du jaunissement des feuilles du cycle 1 au cycle 3 chez les plantes ayant reçu des amendements phosphatés riches en TSP (T5 et T6). Cela pourrait s'expliquer par la nature du TSP, qui libère rapidement du phosphore assimilable, mais dont l'effet dans le sol est de courte durée. Au fur et à mesure que la quantité de phosphore disponible provenant du TSP diminue, les symptômes de toxicité ferreuse s'aggravent. [28] souligne que la teneur en phosphore assimilable diminue après une année de culture sur des sols tropicaux lessivés ayant reçu du phosphate soluble, ce qui entraîne une baisse des rendements. L'absorption excessive de fer par les plants de riz conduit non seulement à la décoloration des feuilles, mais aussi à une réduction significative du tallage et de la hauteur des plants [29], causant des pertes de rendement allant de 16 à 78 % [30, 31].

En revanche, chez les plantes ayant reçu des amendements phosphatés riches en RP, une réduction progressive des taches brunes et du jaunissement des feuilles a été observée du cycle 1 au cycle 3, avec une diminution des symptômes atteignant 50 % pour le traitement T2. Cela s'explique par l'effet progressif de la roche phosphatée (RP), qui libère le phosphore de manière plus lente et continue dans le sol. Selon [32], les manifestations de la toxicité ferreuse peuvent être attribuées à des déficiences en phosphore ainsi qu'à l'acidité des sols.

4.3 ARRIERES EFFETS DES AMENDEMENTS PHOSPHATES (AP) SUR LA DYNAMIQUE DU FER

L'étude de la dynamique du fer dans le sol après l'apport d'amendements phosphatés a révélé une diminution des fractions de fer hydrosoluble (Fe-Hydro), échangeable (Fe-Ech), acido-soluble (Fe-Acido) et biodisponible (Fe-Bio), comparativement aux sols non amendés. Les résultats montrent également une réduction progressive de la proportion de fer biodisponible du cycle 1 au cycle 3, particulièrement dans les sols amendés par rapport aux sols non amendés. Cette réduction des fractions de fer est attribuée à la dissolution de la roche phosphatée (RP) et à la grande solubilité du triple super phosphate (TSP) dans l'eau. En conditions réductrices (bas-fond), la concentration en fer ferreux augmente en raison de la réduction du fer ferrique, favorisant ainsi l'adsorption du phosphore par les ions ferreux, et par conséquent l'augmentation de la fraction P-Fe, comme l'ont montré [33]. Cette hausse de la fraction de phosphore lié aux oxydes de fer entraîne une baisse du fer dans les différentes fractions du sol. Nos résultats révèlent ainsi une fixation et une immobilisation du phosphore par les ions ferreux sous forme de phosphate de fer, suite à l'apport d'amendements phosphatés. Ce phénomène pourrait aussi expliquer la réduction des symptômes de toxicité ferreuse (taches brunes et jaunissement des feuilles de riz) du cycle 1 au cycle 3, observée chez les plants ayant reçu des AP. La faible proportion de fer biodisponible (Fe-Bio) et de fer peu biodisponible (Fe peu bio) dans les sols amendés, par rapport à ceux non amendés, est corrélée négativement aux rendements en grain et paille du riz plus élevés et positivement aux symptômes de toxicité ferreuse chez la plante dans les

parcelles amendées. Cela suggère que la majeure partie du phosphore absorbé par les plantes ne provient pas directement des amendements phosphatés, mais pourrait plutôt résulter du relargage de formes complexes de phosphore liées au fer ou à l'aluminium dans la solution du sol, ainsi que de la réduction de l'acidité, comme l'ont suggéré [33]. En outre, la diminution de l'acidité due à la solubilisation des amendements phosphatés, qui contiennent du calcium, pourrait ralentir la solubilisation du fer dans le sol. En milieu acide, le fer se combine avec l'acide phosphorique pour former des phosphates ferriques insolubles et non assimilables [34]. Ces résultats sont également en accord avec ceux de [35], qui ont observé une baisse significative du fer biodisponible après l'apport d'AP, ainsi qu'avec les travaux de [33], qui ont montré que les AP réduisent la toxicité ferreuse et aluminique. Ainsi, le phosphore libéré rapidement par le TSP ou plus lentement par la RP aurait tendance à immobiliser le fer biodisponible dans la solution du sol, entraînant une diminution des formes bio ou peu disponibles de fer [36, 37]. L'amélioration des paramètres du sol, tels que le pH et la disponibilité du phosphore labile, après l'apport d'AP [15, 2], pourrait ainsi favoriser la fixation du phosphore sous forme de phosphate de fer, réduisant ainsi la fraction de fer biodisponible ou non biodisponible.

5 CONCLUSION

Les présentes études mettent en évidence l'importance des amendements phosphatés (AP) dans l'amélioration des paramètres agronomiques du riz de bas-fond. Les résultats montrent que l'apport de phosphore, qu'il provienne de la roche phosphatée naturelle (RP) ou du triple super phosphate (TSP), influence positivement la croissance, la fertilité et le rendement du riz en réduisant les taux de talles infertiles et de panicules stériles. Toutefois, les effets à long terme diffèrent en fonction du type d'amendement utilisé. Le TSP, en raison de sa solubilité rapide, stimule une croissance végétative initiale, mais son efficacité décroît avec le temps, entraînant une remontée des symptômes de toxicité ferreuse et une baisse du rendement. À l'inverse, la RP, avec sa libération lente et progressive du phosphore, permet une réduction continue des symptômes de toxicité ferreuse tout en maintenant un bon niveau de rendement sur plusieurs cycles. Par ailleurs, l'interaction entre la disponibilité du phosphore et la dynamique du fer dans le sol a révélé un lien crucial entre la diminution des fractions de fer biodisponibles et l'amélioration des rendements. En effet, l'immobilisation progressive du fer par les ions phosphore favorise un meilleur équilibre nutritionnel pour le riz, réduisant ainsi les effets néfastes de la toxicité ferreuse, notamment les taches brunes et le jaunissement des feuilles. L'utilisation des amendements phosphatés, et en particulier de la RP, apparaît comme une stratégie durable pour améliorer la productivité du riz de bas-fond tout en atténuant les effets négatifs de la toxicité ferreuse, fréquente dans les sols acides et saturés d'eau. Ces résultats soulignent l'importance de bien choisir la forme de phosphore à utiliser en fonction des conditions édaphiques et des objectifs à long terme pour optimiser la fertilité des sols et la performance des cultures.

REMERCIEMENTS

La concrétisation de ce projet a été rendue possible grâce à l'appui de l'Office Chérifien des Phosphates (OCP) en Côte d'Ivoire, dans le cadre de la mise en œuvre du projet ASORPRI -OCP Africa, Cette étude, menée au Centre National de Recherche Agronomique de Gagnoa (CNRA), a pu être réalisée grâce à la collaboration de la station de recherche CNRA et de leurs partenaires en milieu paysans, qui a généreusement mis à notre disposition des parcelles rizicoles pour la mise en place des expérimentations

REFERENCES

- [1] Sahrawat K. L., Jones M., Diatta S. and Adam A. Response of Upland Rice to fertilizer Phosphorus and its Residual Value in an Ultisol. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32 (15 & 16): 2457 – 2468, 2001.
- [2] Bongoua-Devisme, A. Jeanne, Kpan W. Hippolyte, Bahan L. F. M., Koné B., Kouadio K-K. H., Adou K. Pla, and Koko L. A. K. «Residual Effect of Phosphate Amendments on Agronomic Parameters of Rainfed Rice in Three Agroecological Zones of Côte d'Ivoire». *Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 10 (3): 57-71, 2024. <https://doi.org/10.9734/ajsspn/2024/v10i3319>.
- [3] Maranguit D., Guillaume, T., Kuzyakov Y., Effects of flooding on phosphorus and iron mobilization in highly weathered soils under different land-use types: Short-term effects and mechanisms, *CATENA*, Volume 158, Pages 161-170, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.06.023>.
- [4] Koné B., Ettien J. B., Amadji G. L., Diatta S. et M. Camara. Effets d'engrais phosphates de différentes origines sur la production rizicole pluviale des sols acides en zone de forêt semi-montagneuse sous climats tropicaux: Cas des hyperdystric ferralsols sous jachères en Côte d'Ivoire. *Etude et gestion des sols*, 17 (1): 7 – 17, 2010.
- [5] Kpan W. H., Bongoua-Devisme A.J., Kouadio K.-K.H., Koné B., And Bahan F. M. L. Response of lowland rice to phosphate amendments in three acidics agroecological zones of Côte d'Ivoire: Man-Gagnoa-Bouaké. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 8 (5): 135-144, 2023 DOI: 10.22161/ijeab.85.18.
- [6] Jiaofeng, G., Yang H., Peng Z., Bohan L., Hang Z. Increasing phosphorus inhibits the retention and prevention of cadmium by iron plaque and promotes cadmium accumulation in rice plants, *Chemosphere*, Volume 307, Part 1, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135642>.

- [7] Cherif M., Fofana M., Audebert A. and Zouzou M. Significant aspects of iron toxicity in West Africa, pp. 141-148, In: Audebert A., Narteh L.T., Kiepe P., Millar D. and Beks B. (Editors.), *Iron Toxicity in Rice-based Systems in West Africa*, Africa Rice Center (WARDA), Cotonou, Benin 175 p, 2006.
- [8] Becker M. & Asch F. Iron toxicity in rice-condition and management concepts. *J. Plant Nutri. Soil Sci.* 168, 558-573, 2005.
- [9] Audebert A., Becker M., and Johnson D. Differential response of rice to hydrological conditions and agronomic management. *African Crop Sciences Journal* 4, 107-111, 1999.
- [10] Sonu N. S, Singh V.J., Pandey R., Gopala K. S., Bhowmick P.K., Ellur RK, Bollinedi H, Harshitha BS, Yadav S, Beniwal R, Nagarajan M, Singh AK and Vinod KK. Implications of tolerance to iron toxicity on root system architecture changes in rice (*Oryza sativa* L.). *Front. Sustain. Food Syst.* 7: 1334487, 2024. doi: 10.3389/fsufs.2023.1334487.
- [11] Saleem M. M., Muhammad A. and Muhammad Y. Effectiveness of Various Approaches to Use Rock Phosphate as a Potential Source of Plant Available P for Sustainable Wheat Production. *International Journal of Agriculture & Biology*, 15 (2): 223–230, 2013. <http://www.fspublishers.org>.
- [12] INGER, I. Standard evaluation system for rice. In *The International Rice Testing program*. The International Rice Research Institute. Los Banos. Philippines, 1988.
- [13] Wu, L.-B. B., Shhadi, M. Y., Gregorio, G., Matthus, E., Becker, M., & Frei, M. Genetic and physiological analysis of tolerance to acute iron toxicity in rice. *Rice* (New York, N.Y.), 2014. <https://doi.org/10.1186/s12284-014-0008-3>.
- [14] Mathieu, C. & Pielain, F. *Analyse chimique des sols Méthodes choisies*. Lavoisier ed, Paris, 387 p., 2003.
- [15] Sanogo S., Paul A. K., Zoumana K., Mameri C. Evaluation de l'effet de doses d'azote et de phosphore sur des paramètres agromorphologiques et du rendement du riz : cas de la variété Djoukèmin dans un bas-fond de la région de Gagnoa. *Journal International de la Recherche Scientifique*, 1, 8–16, 2020.
- [16] Ngoucheme M, Fritz Oben, T, Gilles Raoul, L, M, & Jean, F. Effets combinés des dates de semis et de la fertilisation minérale sur la performance du riz NERICA L56 dans la plaine des Mbo, Cameroun. *Journal of Applied Biosciences*, 148, 15190–15201, 2020. <https://doi.org/10.35759/jabs>, 148,3.
- [17] Kotchi V, Yao-Kouamé A, Diatta S. Réponse de cinq variétés de riz à l'apport de phosphate naturel de Tilemsi (Mali) sur les sols acides de la région forestière humide de Man (Côte d'Ivoire). *J. Appl. Biosci.*, 31 (07): 1895-1905, 2010. DOI: <https://www.m.elewa.org/JABS/2010/31/3.pdf>
- [18] IRRI International Rice Research Institute, 1995. *Rice Facts*. 2. International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines, 1995.
- [19] Raju R A, Reddy M N and Reddy K A. Performance of phosphorus -Carriers in wetland rice (*Oryza sativa*, L.) on riverine alluvials. *Indian Journal of Agronomy* 42 (2): 272-4, 1997.
- [20] Alam, M. M., Amin, A. K. M. R., Ali, M., Ruhul, A., & Hasanuzzaman, M. Yield Attributes, Yield and Harvest Index of Three Irrigated Rice Varieties Under Different Levels Phosphorus. *Biological Research*, 2009.
- [21] Massawe P. I. and Mrema J. Effects of Different Phosphorus Fertilizers on Rice (*Oryza sativa* L.) Yield Components and Grain Yields. *Asian Journal of Advances in Agricultural Research* 3 (2): 1-13, 2017.
- [22] Bihari B, Singh YK, Shambhavi S, Mandal J, Kumar S, Kumar R. Nutrient use efficiency indices of N, P and K under rice-wheat cropping system in LTFE after 34th crop cycle. *J. Plant Nutr.*, 45 (1): 1-18, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1943674>.
- [23] Food and Agriculture Organization (FAO). *Socio-economic Analysis and Policy Implications of the Roles of Agriculture in Developing Countries*. Summary Report, Roles of Agriculture Project, FAO, Rome, Italy, 2004.
- [24] Ali Norhidayah, Kamaruzaman Jusoff, Syukriah Ali, Najah Mokhtar, Azni Syafena Andin Salamat, (2009). The Factors Influencing Students' Performance at University Teknologi MARA Kedah, Malaysia. *Article Management Science and Engineering* ISSN 1913-0341 Vol.3 No.4 2009 Canadian Research & Development Center of Sciences and Cultures. 12/20/2009 <http://www.cscanada.org> <http://www.cscanada.net> E-mail: cscanada.mse@gmail.com; caooc@hotmail.com 90 p.
- [25] Smalberger S, Chien SH, Singh U, Henao J. Relative agronomic effectiveness of phosphate rock compared with triple superphosphate for initial canola, wheat, or ryegrass, and residual wheat in two acid soils. *Soil Sci.*, 175 (1): 36-43, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1097/SS.0b013e3181c752dd>.
- [26] Bongoua-Devisme.A.J. Implication des communautés bactériennes ferri-réductrices et des paramètres environnementaux dans le fonctionnement et la qualité des sols de rizières (Thaïlande et Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat en Sciences du Sol, option Géomicrobiologie, 230 p, 2009.
- [27] Fageria NK., Santos NAB., Barbosa MP., Quimanques CM. Iron toxicity in lowland rice. *J.Plant Nutr.*, 31 (9): 1676-1699, 2008.
- [28] Fox R. L. Phosphorus - A Basic Nutrient for Soil Improvement. K. M. Pretty and S. F. Dowdle (Eds.). *Proceedings of the International Conference on the Management and Fertilization of Upland Soils in the Tropics and Subtropics*. Chinese Academy of Sciences and The Ministry of Agriculture, Animal Husbandry and Fisheries of the People's Republic of China, Nanjing. pp. 57 - 63, 1998.
- [29] Tamaung, M. Physiological mechanisms of iron toxicity tolerance in lowland rice. Thesis in partial fulfillment of the requirements for the academic degree of Master of Science. Faculty of Agriculture Rheinische Friedrich-Wilhelm's Universität zu Bonn, 67p, 2006.
- [30] Chérif M., Audebert A., Fofana M. & Zouzou M. Evaluation of Iron Toxicity on Lowland Irrigated Rice in West Africa. *Tropicultura*, 2009, 27, 2, 88-92, 2009.

- [31] Audebert, A. et Fofana, M. Écart de rendement du riz dû à la toxicité du fer en Afrique de l'Ouest. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 196, 66-76, 2009 <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2008.00339.x>.
- [32] Kirk GJD., *The Biogeochemistry of Submerged Soils*. John Wiley et Sons: Chichester, UK; 291p, 2004.
- [33] Kouakou S. A. A.E., Bongoua-Devisme A.J., Kouadio K-K. H., Gouze Bi A. D. et Bahan F. M. L. Effets combinés de la roche phosphatée du Maroc et de fertilisants chimiques sur la dynamique du phosphore dans le sol: cas des parcelles rizicoles de Man, Ouest de la Côte d'Ivoire. *Afrique Science*, 24 (1): 1 – 13, 2024.
- [34] Diatta S., et Sahrawat R. K. Iron toxicity of rice in West Africa: screening tolerant varieties and the role of N, P, K and Zn. In A. Audebert, L. T. Narteh, P. Kiepe, D. Millar & B. Beks (Eds.), *Iron Toxicity in Rice-based Systems in West Africa* Africa Rice Center (WARDA). pp. 75-81, 2006.
- [35] Hodomihou R. N., Agbossou E. K., Amadji G. L. et Nacrao H. B. Effets de différentes doses de phosphate naturel sur la réduction de la toxicité ferreuse des sols du bas fond de Niaouli au sud Benin. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 5 (6): pp.2278-2290, 2011.
- [36] Chien S. H., Sale P. W. G. and D. K. Friesen. A Discussion of the Methods for Comparing the Relative Effectiveness of Phosphate Fertilizers Varying in Solubility. *Fert. Res.*, 24: 149 – 157, 1990.
- [37] Sani, O., Zanguina, A., et Ibrahim, N. *Traitement Des Phosphates Naturels De Tahoua*. Université Abdou Moumouni de Niamey, Niger. 176 p, 2017.

Analyse des facteurs psychologiques influençant la motivation des élèves des CEG de Bembéréké envers les mathématiques

[Analysis of psychological factors influencing the motivation of Bembéréké CEG students towards mathematics]

N. S. HOUEHA¹, D. I. SAVI¹, and Pagnamam POROMNA²

¹Ecole Normale Supérieure (ENS) de Natitingou, Université Nationale des Sciences, Technologies et Ingénierie et Mathématiques, Benin

²Institut de formation en Sciences Pédagogiques et Administration Universitaire (ISPAU), Université de Kara, Togo

Copyright © 2024 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 explores the psychological factors influencing students' motivation in mathematics at General Education Colleges (CEG) in Bembéréké, Benin. The main objective is to identify the psychological dynamics that affect student engagement in this subject. A qualitative approach was adopted, involving 170 students and 33 teachers. Data were collected using questionnaires and analyzed through a combination of thematic and statistical analyses. The results show that the majority of students perceive themselves as having average or below-average competence in mathematics, which negatively impacts their motivation. Additionally, a high level of math anxiety was observed, constituting a major obstacle to learning. Despite moderate to high interest in mathematics, students' intrinsic motivation remains low, limiting their long-term engagement. The findings suggest the need to rethink pedagogical strategies to better meet students' needs by integrating psychological support programs and more interactive teaching methods. This research makes a significant contribution to understanding students' motivation in mathematics in underrepresented educational contexts and proposes ways to improve student engagement and academic performance.

KEYWORDS: psychological factors, math anxiety, motivation, teaching strategies.

RESUME: Cette recherche explore les facteurs psychologiques influençant la motivation des élèves en mathématiques dans les Collèges d'Enseignement Général (CEG) de Bembéréké, au Bénin. L'objectif principal est d'identifier les dynamiques psychologiques qui affectent l'engagement des élèves dans cette discipline. Une approche qualitative a été adoptée, impliquant 170 élèves et 33 enseignants. Les données ont été collectées à l'aide de questionnaires et analysées par une combinaison d'analyses thématiques et statistiques. Les résultats montrent que la majorité des élèves se perçoivent comme ayant des compétences moyennes ou inférieures à la moyenne en mathématiques, ce qui affecte négativement leur motivation. De plus, un niveau élevé d'anxiété mathématique a été observé, ce qui constitue un obstacle majeur à l'apprentissage. En dépit d'un intérêt modéré à élever pour les mathématiques, la motivation intrinsèque des élèves reste faible, limitant leur engagement à long terme. Les conclusions suggèrent la nécessité de repenser les stratégies pédagogiques pour mieux répondre aux besoins des élèves, en intégrant des programmes de soutien psychologique et des méthodes d'enseignement plus interactives. Cette recherche apporte une contribution significative à la compréhension de la motivation des élèves en mathématiques dans des contextes éducatifs sous-représentés et propose des pistes pour améliorer l'engagement et les performances scolaires.

MOTS-CLEFS: facteurs psychologiques, anxiété mathématique, motivation, stratégies pédagogiques.

1 INTRODUCTION

L'éducation mathématique au Bénin, particulièrement dans les Collèges d'Enseignement Général (CEG) de Bembéréké, fait face à des défis considérables. Malgré les efforts des autorités éducatives pour améliorer les infrastructures et les conditions d'apprentissage, les résultats des élèves aux examens nationaux demeurent préoccupants. Les mathématiques, en tant que matière fondamentale pour le développement scientifique et technologique, sont souvent perçues comme une discipline difficile par les élèves, ce qui se traduit par une faible motivation et de faibles taux de réussite. Ce problème met en lumière l'importance d'une analyse approfondie des facteurs qui influencent cette motivation.

La littérature récente sur la motivation en mathématiques souligne plusieurs facteurs psychologiques cruciaux. Parmi eux, l'estime de soi, la perception de compétence, l'anxiété mathématique, ainsi que les motivations intrinsèques et extrinsèques jouent des rôles déterminants (Hembree, 1990; Ma, 1999; Wigfield & Eccles, 2000). Les élèves ayant une faible estime de soi en mathématiques, par exemple, tendent à éviter cette matière, contribuant ainsi à un cycle de désengagement et de mauvaise performance (Marsh & Craven, 2006; Stipek & Gralinski, 1996). De plus, l'anxiété mathématique, qui peut se manifester par une peur intense des situations d'apprentissage mathématique, constitue un obstacle majeur à l'engagement des élèves (Ashcraft & Krause, 2007). Ces éléments mettent en évidence la nécessité de mieux comprendre les dynamiques psychologiques à l'œuvre pour développer des interventions pédagogiques efficaces.

Dans le contexte des CEG de Bembéréké, il est crucial d'explorer les mécanismes psychologiques qui sous-tendent la motivation des élèves en mathématiques. Pourquoi certains élèves sont-ils motivés à s'engager dans l'apprentissage des mathématiques alors que d'autres les perçoivent comme une source de stress et d'échec ? Comment ces perceptions influencent-elles leurs performances académiques ?

L'objectif principal de cette étude est d'identifier et d'analyser les facteurs psychologiques qui influencent la motivation des élèves en mathématiques dans les CEG de Bembéréké. Plus spécifiquement, cette recherche vise à analyser les différents facteurs psychologiques affectant la motivation des élèves en mathématiques, identifier les interactions entre ces facteurs et leur impact sur l'engagement des élèves, et proposer des stratégies d'intervention pour renforcer la motivation des élèves en mathématiques.

Pour atteindre ces objectifs, l'étude s'appuie sur un cadre théorique intégrant plusieurs concepts clés de la psychologie de l'apprentissage, tels que la théorie de l'autodétermination (Deci & Ryan, 1985), l'auto-efficacité (Bandura, 1997), et la théorie de l'attribution (Weiner, 1985).

2 CADRE THEORIQUE

L'étude de la motivation des élèves en mathématiques se fonde sur plusieurs théories psychologiques fondamentales qui permettent d'expliquer les dynamiques complexes influençant l'engagement des élèves. Ces théories fournissent un cadre conceptuel pour analyser les variables psychologiques telles que l'estime de soi, l'anxiété mathématique, et les différents types de motivation, intrinsèque et extrinsèque, qui jouent un rôle crucial dans l'apprentissage des mathématiques.

La théorie de l'autodétermination, développée par Deci et Ryan (1985), constitue un point de départ essentiel. Cette théorie postule que la motivation humaine est un continuum allant de la motivation extrinsèque, où les actions sont menées pour obtenir une récompense ou éviter une punition, à la motivation intrinsèque, où les actions sont entreprises par pur plaisir ou intérêt. Selon cette théorie, les élèves seront plus motivés en mathématiques s'ils ressentent une autonomie, une compétence, et une connexion avec leur environnement. Dans le contexte des CEG de Bembéréké, il est important d'évaluer dans quelle mesure les élèves perçoivent leur apprentissage en mathématiques comme étant autodéterminé, et comment cela influence leur engagement.

La théorie de l'auto-efficacité, introduite par Bandura (1997), est également centrale dans ce cadre théorique. L'auto-efficacité désigne la croyance d'un individu en sa capacité à réussir une tâche spécifique. En mathématiques, les élèves ayant une forte auto-efficacité sont plus susceptibles de persévérer face aux difficultés, de prendre des risques calculés et de montrer un engagement plus soutenu dans leur apprentissage. Cette théorie est particulièrement pertinente pour comprendre pourquoi certains élèves des CEG de Bembéréké sont capables de surmonter les défis mathématiques alors que d'autres abandonnent rapidement.

La théorie de l'attribution, proposée par Weiner (1985), offre un autre angle d'analyse. Selon cette théorie, les individus attribuent leurs succès ou échecs à des causes spécifiques, qui peuvent être internes (comme l'effort ou l'habileté) ou externes (comme la chance ou la difficulté de la tâche). Les attributions influencent directement la motivation et les émotions des élèves. Par exemple, un élève qui attribue ses succès en mathématiques à son effort personnel sera plus motivé à continuer à travailler dur, tandis qu'un élève qui attribue ses échecs à une incapacité innée pourrait se décourager.

Enfin, la perception de la valeur de l'enseignement joue un rôle clé dans la motivation des élèves. Eccles et Wigfield (2002) ont démontré que les élèves sont plus motivés lorsqu'ils perçoivent les mathématiques comme pertinentes pour leur avenir personnel et professionnel. Cette perception de la valeur influence non seulement l'engagement des élèves, mais aussi leur persévérance face aux défis académiques.

Ce cadre théorique multidimensionnel permet de comprendre les facteurs psychologiques qui influencent la motivation des élèves en mathématiques. En combinant ces théories, l'étude vise à fournir une analyse approfondie des dynamiques motivationnelles spécifiques aux élèves des CEG de Bembéréké et à proposer des stratégies d'intervention adaptées.

3 DEMARCHE METHODOLOGIE

Pour comprendre les facteurs psychologiques influençant la motivation des élèves en mathématiques dans les Collèges d'Enseignement Général (CEG) de Bembéréké, une approche de recherche qualitative a été adoptée. Cette méthodologie permet une exploration approfondie des perceptions, des attitudes et des expériences des élèves et des enseignants dans ce contexte spécifique. L'approche qualitative est particulièrement adaptée à cette étude, car elle permet de saisir les nuances des dynamiques motivationnelles à travers des descriptions riches et détaillées.

L'étude s'est déroulée dans trois établissements d'enseignement secondaire à Bembéréké: le Collège d'Enseignement Général de Bembéréké, le Prytanée Militaire de Bembéréké (PMB), et le Collège Catholique Marie Adélaïde (CCMA). Ces établissements ont été choisis en raison de leur représentativité des réalités éducatives de la région. La population étudiée comprenait 170 élèves répartis entre ces trois établissements, ainsi que 33 enseignants de mathématiques. La diversité des participants a permis de recueillir une gamme variée de perspectives, enrichissant ainsi la portée des résultats.

La collecte de données a été effectuée à l'aide de questionnaires élaborés spécifiquement pour cette étude. Les questionnaires adressés aux élèves visaient à explorer leur perception de compétence, leur niveau d'anxiété mathématique, leur motivation intrinsèque et extrinsèque, ainsi que leurs attitudes générales envers les mathématiques. Les enseignants ont également été interrogés sur leurs perceptions de la motivation des élèves, les stratégies pédagogiques qu'ils utilisent, et les défis qu'ils rencontrent dans l'enseignement des mathématiques.

Pour garantir la qualité et la fiabilité des données, des procédures rigoureuses ont été mises en place. Avant le déploiement des questionnaires, des séances d'information ont été organisées pour expliquer aux participants les objectifs de l'étude et les méthodes de collecte de données. Le consentement éclairé a été obtenu de tous les participants, assurant ainsi le respect de leur volonté et la confidentialité des informations fournies.

L'analyse des données a été réalisée à l'aide d'une approche mixte, combinant des méthodes qualitatives et quantitatives. Les réponses ouvertes ont été soumises à une analyse thématique, identifiant les motifs récurrents et les tendances majeures dans les perceptions des élèves et des enseignants. Les données quantitatives issues des questions fermées ont été analysées statistiquement pour évaluer les corrélations entre les différents facteurs psychologiques et la motivation des élèves. Cette approche intégrée a permis de fournir une compréhension riche et nuancée des influences psychologiques sur la motivation scolaire.

En somme, la méthodologie adoptée dans cette étude a permis de capturer une image complète des dynamiques motivationnelles des élèves en mathématiques dans les CEG de Bembéréké, en tenant compte des contextes spécifiques et des défis uniques auxquels ces élèves sont confrontés. Les résultats de cette analyse fournissent des bases solides pour des interventions pédagogiques ciblées, visant à améliorer l'engagement et la performance des élèves en mathématiques.

4 RESULTATS

L'analyse des données collectées a permis de mettre en lumière plusieurs facteurs psychologiques influençant la motivation des élèves en mathématiques dans les Collèges d'Enseignement Général (CEG) de Bembéréké. Les résultats sont présentés ci-dessous sous forme de figures pour illustrer de manière claire et concise les tendances observées.

4.1 PERCEPTION DE COMPETENCE EN MATHÉMATIQUES

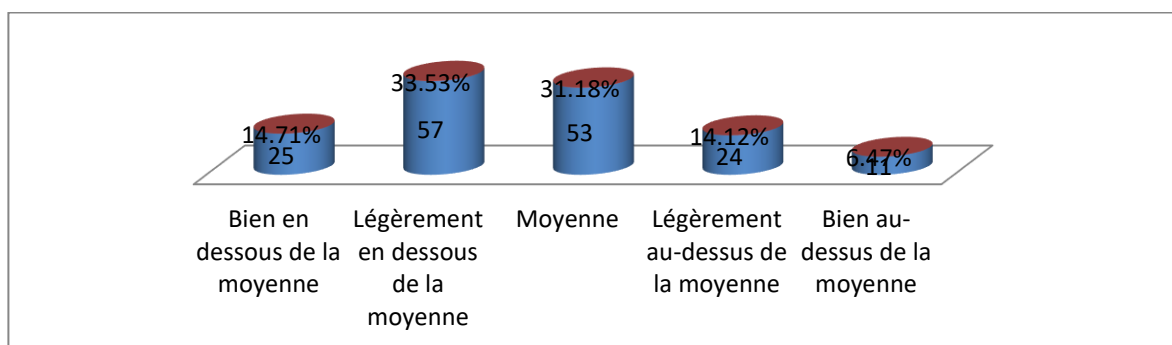


Fig. 1. Répartition des élèves selon leur perception de compétence en mathématiques

Les élèves ont été interrogés sur leur perception de leur propre compétence en mathématiques par rapport à leurs pairs. Comme illustré dans la Figure 1, une majorité d'élèves se considère comme ayant des compétences moyennes (31,18 %) ou légèrement en dessous de la moyenne (33,53 %) voire bien en dessous de la moyenne (14,71 %). Seul un faible pourcentage d'élèves se perçoit comme étant bien au-dessus de la moyenne (6,47 %), ce qui suggère une estime de soi relativement faible dans cette discipline.

4.2 ANXIÉTÉ MATHÉMATIQUE

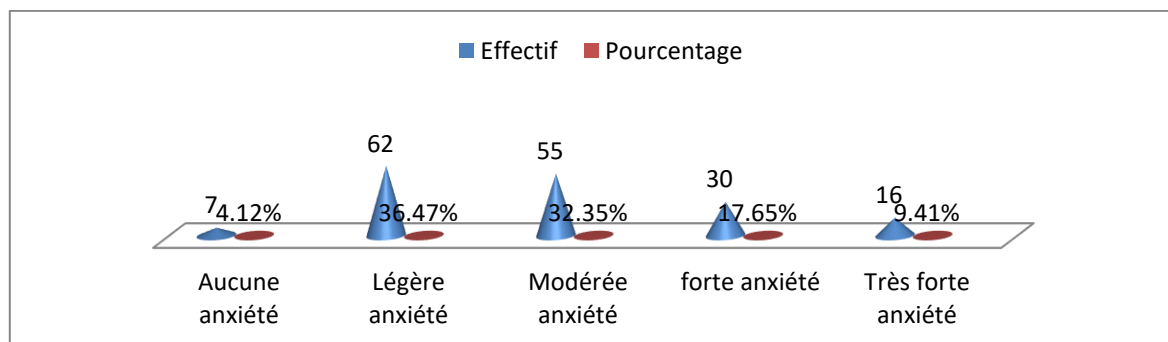


Fig. 2. Différents niveaux d'anxiété mathématique parmi les élèves interrogés

L'anxiété mathématique s'est révélée être un facteur significatif affectant la motivation des élèves. La Figure 2 montre que 36,47 % des élèves ressentent une légère anxiété lors de la résolution de problèmes mathématiques, tandis que 32,35 % éprouvent une anxiété modérée. Un groupe non négligeable de 17,65 % des élèves ressent une forte anxiété, et 9,41 % une très forte anxiété. Seuls 4,12 % des élèves ne ressentent aucune anxiété face aux mathématiques.

4.3 MOTIVATION INTRINSÈQUE ET EXTRINSÈQUE

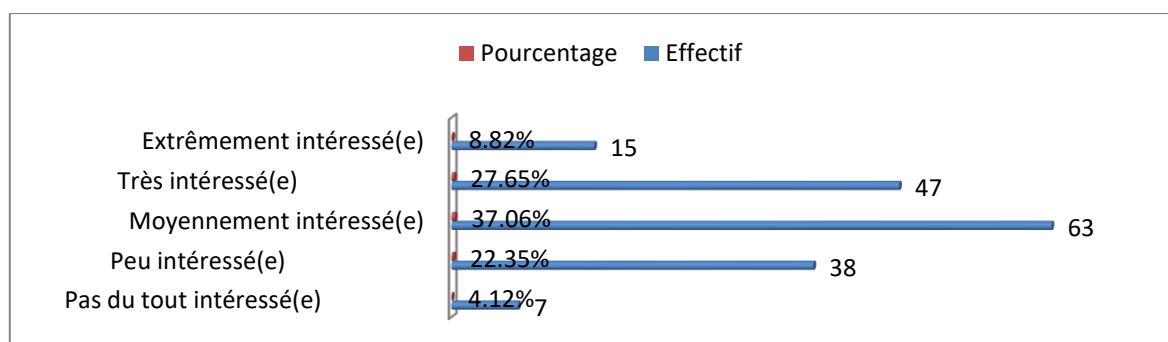


Fig. 3. Niveau d'intérêt des élèves pour les mathématiques

La motivation des élèves a été évaluée à travers leur intérêt pour les mathématiques et la perception de leur importance pour l'avenir. Comme indiqué dans la Figure 3, 37,06 % des élèves sont moyennement intéressés par les mathématiques, tandis que 27,65 % se disent très intéressés. Cependant, un faible pourcentage (8,82 %) se déclare extrêmement intéressé par la matière. En ce qui concerne l'importance perçue des mathématiques pour leur avenir, 43,53 % des élèves considèrent que la réussite en mathématiques est très importante, comme le montre la Figure 4.

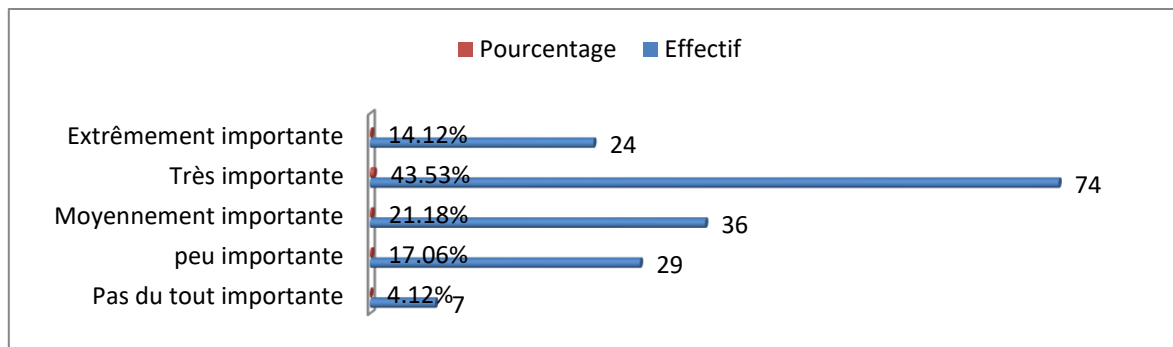


Fig. 4. Perception des élèves quant à l'importance des mathématiques pour leur avenir personnel et professionnel

4.4 OBSTACLES À L'APPRENTISSAGE DES MATHÉMATIQUES

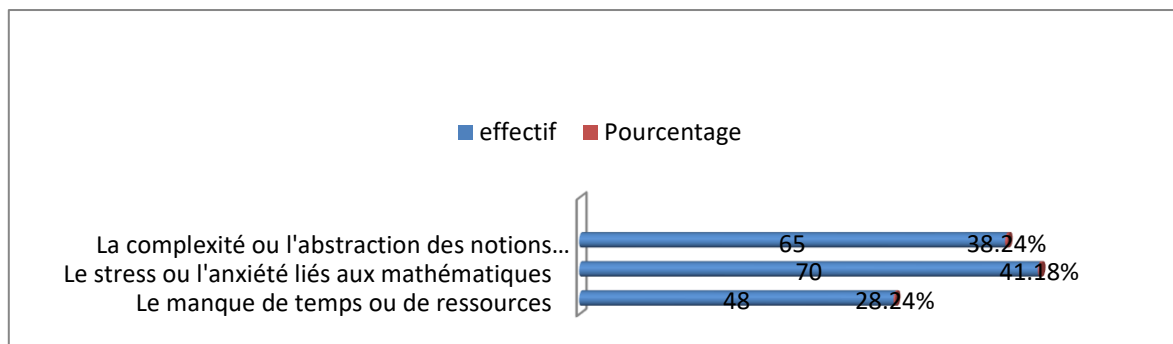


Fig. 5. Principaux obstacles perçus par les élèves dans l'apprentissage des mathématiques

Les élèves ont également identifié les principaux obstacles rencontrés dans l'apprentissage des mathématiques. La Figure 5 révèle que le stress ou l'anxiété lié aux mathématiques est le facteur le plus souvent cité (41,18 %), suivi de la complexité ou de l'abstraction des notions mathématiques (38,24 %) et du manque de temps ou de ressources (28,24 %).

4.5 IMPACT DU STRESS SUR LA MOTIVATION

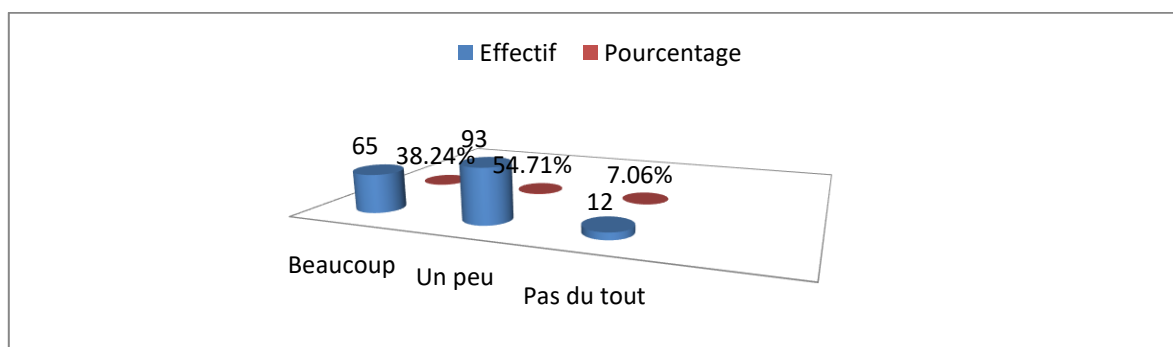


Fig. 6. Impact du stress lié aux mathématiques sur la motivation des élèves

Enfin, l'étude a évalué l'impact du stress lié aux mathématiques sur la motivation des élèves. Comme illustré dans la Figure 6, 54,71 % des élèves ont déclaré que le stress affecte leur motivation "un peu", tandis que 38,24 % estiment que le stress affecte "beaucoup" leur motivation. Seuls 7,06 % des élèves ont indiqué que le stress n'a aucun impact sur leur motivation.

Ces résultats révèlent que la perception de compétence, l'anxiété mathématique, et la motivation intrinsèque et extrinsèque sont des facteurs cruciaux influençant l'engagement des élèves en mathématiques dans les CEG de Bembéréké. Ces résultats soulignent l'importance de développer des interventions pédagogiques ciblées pour réduire l'anxiété et améliorer la perception de compétence afin de favoriser une meilleure motivation chez les élèves.

5 DISCUSSION

Les résultats de cette étude mettent en évidence des dynamiques complexes entre les facteurs psychologiques et la motivation des élèves en mathématiques dans les Collèges d'Enseignement Général (CEG) de Bembéréké. Ces résultats, bien qu'en ligne avec certains travaux antérieurs, présentent des différences notables qui enrichissent la compréhension actuelle de la motivation en contexte éducatif béninois.

5.1 PERCEPTION DE COMPÉTENCE ET MOTIVATION

La perception de compétence s'est révélée être un facteur central influençant la motivation des élèves en mathématiques. Les élèves qui se considèrent comme compétents sont davantage motivés, ce qui est cohérent avec les conclusions de Marsh et Craven (2006) et Stipek et Gralinski (1996). Toutefois, notre étude montre que la majorité des élèves de Bembéréké se perçoivent comme ayant des compétences moyennes ou inférieures à la moyenne, une tendance plus marquée que celle rapportée dans des études similaires menées dans d'autres contextes. Cette faible perception de compétence pourrait être liée à des facteurs contextuels spécifiques, tels que le manque de ressources ou l'absence de soutien pédagogique adapté, qui ne sont pas toujours considérés dans les études menées dans des environnements éducatifs plus favorisés.

5.2 ANXIÉTÉ MATHÉMATIQUE

L'anxiété mathématique est largement reconnue comme un facteur inhibiteur de la performance académique (Ashcraft & Krause, 2007). Nos résultats confirment ce lien, révélant que plus de deux tiers des élèves ressentent une anxiété allant de légère à modérée, avec un quart des élèves souffrant d'anxiété élevée. Cependant, un point distinctif de notre étude est l'intensité de cette anxiété dans le contexte des CEG de Bembéréké, qui semble être plus élevée que dans d'autres études. Ce niveau élevé d'anxiété pourrait être attribué à des contextes socio-économiques et culturels spécifiques, où les mathématiques sont perçues comme une matière particulièrement redoutée et où l'échec est fortement stigmatisé. Contrairement à Hembree (1990), qui note une tendance à des niveaux d'anxiété mathématique modérés dans les environnements scolaires plus variés, notre étude souligne une situation plus critique qui nécessite des interventions pédagogiques spécifiques.

5.3 MOTIVATION INTRINSÈQUE ET EXTRINSÈQUE

Les résultats concernant la motivation intrinsèque et extrinsèque montrent que la plupart des élèves de Bembéréké ont un intérêt modéré à élevé pour les mathématiques, ce qui rejoint les conclusions de Lepper, Corpus, et Iyengar (2005) sur l'importance de la motivation intrinsèque pour l'engagement académique. Cependant, un faible pourcentage d'élèves (8,82 %) exprime un intérêt extrême pour les mathématiques, ce qui diffère des taux plus élevés rapportés dans d'autres contextes éducatifs, notamment ceux où l'enseignement des mathématiques est plus valorisé. Cela suggère que les élèves de Bembéréké pourraient bénéficier de stratégies pédagogiques renforçant la perception de la pertinence des mathématiques pour leur avenir, en écho aux travaux d'Eccles et Wigfield (2002) sur la valeur perçue de l'enseignement.

5.4 OBSTACLES À L'APPRENTISSAGE ET IMPACT DU STRESS

Les élèves ont identifié plusieurs obstacles à leur apprentissage des mathématiques, notamment le stress, l'anxiété, et la complexité des notions mathématiques. Ces résultats sont en ligne avec les études de Covington (1992) sur la peur de l'échec, mais ils révèlent également une intensité de stress et d'anxiété plus élevée que celle observée dans d'autres recherches. L'impact du stress sur la motivation, où 38,24 % des élèves rapportent que le stress affecte beaucoup leur motivation, souligne un défi majeur pour l'éducation mathématique dans cette région. Contrairement aux conclusions plus générales de Deci, Koestner, et Ryan (1999) sur les impacts négatifs de la motivation extrinsèque, notre étude montre que dans un contexte de forte anxiété, même une motivation extrinsèque pourrait être insuffisante pour surmonter les obstacles perçus par les élèves.

5.5 CONTRIBUTIONS ET IMPLICATIONS

L'apport de cette étude réside dans la mise en lumière des spécificités contextuelles qui influencent la motivation des élèves en mathématiques dans les CEG de Bembéréké. Contrairement à d'autres études qui mettent principalement en avant des facteurs individuels, notre recherche souligne l'importance de prendre en compte les conditions socio-économiques et culturelles locales. Les niveaux élevés d'anxiété et de stress, combinés à une perception de compétence relativement faible, suggèrent que les stratégies pédagogiques actuellement en place pourraient ne pas être suffisamment adaptées pour répondre aux besoins spécifiques de ces élèves. Cela appelle à une reconfiguration des approches éducatives, intégrant des programmes de soutien ciblés, des méthodes d'enseignement plus interactives, et une meilleure sensibilisation des enseignants aux dynamiques psychologiques en jeu.

En somme, cette recherche enrichit la littérature existante en apportant des données empiriques sur un contexte souvent sous-représenté dans la recherche en éducation. Les résultats obtenus montrent qu'une compréhension fine des particularités locales est essentielle pour développer des interventions pédagogiques efficaces, capables de renforcer la motivation des élèves en mathématiques dans les CEG de Bembéréké et potentiellement dans d'autres contextes similaires.

6 CONCLUSION

Cette recherche a exploré les facteurs psychologiques influençant la motivation des élèves en mathématiques dans les Collèges d'Enseignement Général (CEG) de Bembéréké. En s'appuyant sur une approche qualitative, nous avons identifié des dynamiques complexes entre la perception de compétence, l'anxiété mathématique, et les types de motivation, intrinsèque et extrinsèque, qui jouent un rôle central dans l'engagement des élèves.

Les résultats révèlent que la perception de compétence des élèves en mathématiques est globalement faible, avec une majorité se percevant comme ayant des compétences moyennes ou inférieures à la moyenne. Cette perception négative de soi semble être un obstacle majeur à la motivation, limitant l'engagement des élèves dans cette discipline. De plus, l'anxiété mathématique s'est avérée particulièrement élevée, dépassant les niveaux rapportés dans d'autres études similaires. Cette anxiété, conjuguée à une perception de compétence réduite, contribue à un cycle de désengagement et de faibles performances académiques.

Par ailleurs, bien que la plupart des élèves expriment un intérêt modéré à élevé pour les mathématiques, la motivation intrinsèque reste relativement faible. Cette situation met en lumière la nécessité d'améliorer la perception de la pertinence des mathématiques pour l'avenir des élèves, en renforçant leur compréhension de l'importance de cette discipline dans leur développement personnel et professionnel.

L'apport principal de cette étude réside dans l'accent mis sur les spécificités contextuelles des CEG de Bembéréké. Contrairement à des recherches menées dans des environnements plus favorisés, cette étude souligne l'impact significatif du contexte socio-économique et culturel sur la motivation des élèves. Les résultats suggèrent que les stratégies pédagogiques actuellement en place doivent être reconsidérées pour mieux répondre aux besoins spécifiques des élèves de cette région. Cela pourrait inclure le développement de programmes de soutien psychologique, l'adoption de méthodes d'enseignement plus interactives, et une formation continue des enseignants sur les dynamiques psychologiques en jeu.

En conclusion, cette recherche apporte une contribution significative à la littérature sur la motivation en mathématiques, en offrant des perspectives nouvelles et en soulignant l'importance d'une approche contextuelle pour améliorer l'engagement et les performances des élèves. Les résultats obtenus peuvent servir de base pour des interventions pédagogiques plus adaptées, non seulement dans les CEG de Bembéréké, mais aussi dans d'autres contextes éducatifs similaires, où les défis socio-économiques et psychologiques sont prévalents.

REFERENCES

- [1] Ashcraft, M. H., & Krause, J. A. (2007). Working memory, math performance, and math anxiety. *Psychonomic Bulletin & Review*, 14 (2), 243-248.
- [2] Bandura, A. (1997). *Self-efficacy: The exercise of control*. W.H. Freeman.
- [3] Covington, M. V. (1992). *Making the grade: A self-worth perspective on motivation and school reform*. Cambridge University Press.
- [4] Deci, E. L., & Ryan, R. M. (1985). *Intrinsic motivation and self-determination in human behavior*. Plenum.
- [5] Deci, E. L., Koestner, R., & Ryan, R. M. (1999). A meta-analytic review of experiments examining the effects of extrinsic rewards on intrinsic motivation. *Psychological Bulletin*, 125 (6), 627-668.
- [6] Eccles, J. S., & Wigfield, A. (2002). Motivational beliefs, values, and goals. *Annual Review of Psychology*, 53, 109-132.
- [7] Hembree, R. (1990). The nature, effects, and relief of mathematics anxiety. *Journal for Research in Mathematics Education*, 21 (1), 33-46.
- [8] Lepper, M. R., Corpus, J. H., & Iyengar, S. S. (2005). Intrinsic and extrinsic motivational orientations in the classroom: Age differences and academic correlates. *Journal of Educational Psychology*, 97 (2), 184-196.
- [9] Ma, X. (1999). A meta-analysis of the relationship between anxiety toward mathematics and achievement in mathematics. *Journal for Research in Mathematics Education*, 30 (5), 520-540.
- [10] Marsh, H. W., & Craven, R. G. (2006). Reciprocal effects of self-concept and performance from a multidimensional perspective: Beyond seductive pleasure and unidimensional perspectives. *Perspectives on Psychological Science*, 1 (2), 133-163.
- [11] Stipek, D. J., & Gralinski, J. H. (1996). Children's beliefs about intelligence and school performance. *Journal of Educational Psychology*, 88 (3), 397-407.
- [12] Weiner, B. (1985). An attributional theory of achievement motivation and emotion. *Psychological Review*, 92 (4), 548-573.
- [13] Wigfield, A., & Eccles, J. S. (2000). Expectancy-value theory of achievement motivation. *Contemporary Educational Psychology*, 25 (1), 68-81.

Modélisation et simulation d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation

[Modeling and simulation of a Double Feed Asynchronous Machine]

Agnimoan Constant ALIHONOU¹⁻², Léandre Mathias VISSOH¹, Jules Anicet YAMONCHE¹, Jonas EDOU¹⁻⁴, Victorien CHEGNIMONHAN¹⁻³, and Clotilde Tognon GUIDI¹⁻²

¹Laboratory of Processes and Technological Innovations, National Institute Technology (INSTI) of Lokossa, Lokossa, Benin

²Laboratory for Energy and Applied Mechanics (LEMA, UAC), University of Abomey-Calavy, Abomey-Calavy, Benin

³PTAA CRA Agonkanmey, INRAB, Abomey-Calavy, Benin

⁴Laboratory of Théoritical Physic and Physics Mathematics, University of Abomey-Calavy, Abomey-Calavy, Benin

Copyright © 2024 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The double feed asynchronous machines are increasingly used in modern wind farms to optimize wind turbine performance. These machines have the ability to adapt to variations in wind speed and also contribute to the stability of the electricity network. In this article, the modeling and simulation of the double feed asynchronous machine has been done. The different machine parameters such as speed, torque, flows and currents were analyzed. The results showed that all the quantities of the machine have an oscillating transient regime. Thus, the very unstable open-loop nature of the double feed asynchronous machine appears very clearly. In order to resolve this problem, the use of looped commands becomes essential.

KEYWORDS: stability, oscillating transient regime, open loop, looped control.

RESUME: Les machines asynchrones à double alimentation sont de plus en plus utilisées dans les parcs éoliens modernes afin d'optimiser la performance des éoliennes. Ces machines ont la capacité de s'adapter aux variations de la vitesse du vent et aussi de contribuer à la stabilité du réseau électrique. Dans cet article, la modélisation et la simulation de la machine asynchrone à double alimentation a été faite. Les différents paramètres de la machine tels que la vitesse, le couple, les flux et les courants ont été analysés. Les résultats ont montré que toutes les grandeurs de la machine ont un régime transitoire oscillant. Ainsi, le caractère très instable en boucle ouverte de la machine asynchrone à double alimentation apparaît très clairement. Afin de régler ce problème, le recours aux commandes bouclées devient indispensable.

MOTS-CLEFS: stabilité, régime transitoire oscillant, boucle ouverte, commande bouclée.

1 INTRODUCTION

Les énergies renouvelables, représentent une source d'énergie inépuisable et propre qui joue un rôle essentiel dans la transition vers un système énergétique plus durable et respectueux de l'environnement. Parmi ces énergies, l'éolien se distingue comme une des solutions les plus prometteuses pour réduire notre dépendance aux combustibles fossiles et lutter contre le changement climatique [1]. L'énergie éolienne est captée à l'aide de turbine éolienne qui convertit l'énergie cinétique du vent en électricité. Une avancée significative dans ce domaine est l'utilisation de machine asynchrone à double alimentation (MADA), qui améliore l'efficacité et la flexibilité des systèmes éoliens [1], [2]. Les machines asynchrones à double alimentation

sont largement utilisées dans les parcs éoliens modernes pour optimiser leurs performances, améliorer leur capacité à s'adapter aux variations de la vitesse du vent et contribuer à la stabilité du réseau électrique. Cette technologie représente une étape importante dans l'évolution de l'énergie éolienne vers une source d'électricité fiable, efficace et intégré au réseau [2], [3], [5].

Les machines asynchrones à double alimentation permettent d'alimenter les éoliennes à partir de deux sources d'énergie, la première alimentation est externe au réseau électrique et la deuxième provient du générateur éolien lui-même [4]. Cette configuration offre une meilleure gestion de la puissance, notamment en permettant d'ajuster la vitesse de rotation du générateur pour maximiser la production d'électricité tout en garantissant une stabilité du réseau [1], [2], [4].

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION

Dans le but de rendre plus simple à exploiter les équations électrique et mécanique de la machine asynchrone à double alimentation, nous avons opté pour un changement de repère. Dans notre étude nous avons utilisé la transformation de Park.

2.1.1 TRANSFORMATION DE PARK

Afin de rechercher les lois de contrôle d'une machine à courant alternatif, nous pouvons la modéliser dans le repère (d, q) tournant dont l'orientation est a priori arbitraire. Ce modèle est obtenu après transformation virtuelle de la machine triphasée en une machine diphasée équivalente [6], [7], [8], [9].

Cette transformation qui permet le passage du système triphasé s'effectue en faisant correspondre aux variables réelles leurs composantes homopolaires, directes et en quadrature [6], [7]. La figure n°1 montre la représentation de la MADA dans le repère de Park.

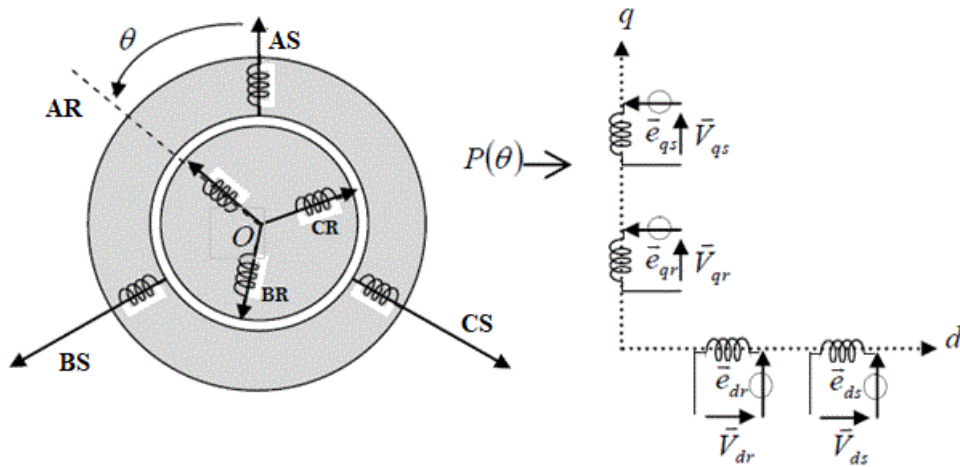


Fig. 1. Représentation de la MADA dans le repère de Park [6], [7], [8]

L'équation (1) illustre la matrice $P(\theta)$ utilisée pour le passage du système triphasé au système biphasé

$$[P(\theta)] = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Le changement de variables relatif aux courants, tensions et flux est défini par la transformation (2):

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = [P(\theta)] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Avec x: tensions, courant ou flux, et les indices suivant représentent:

- **0**: indice de l'axe homopolaire.
- **d**: indice de l'axe direct.
- **q**: indice de l'axe en quadrature.

Et pour la transformation inverse on utilise la matrice $[P(\theta)]^{-1}$:

$$[P(\theta)]^{-1} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Alors les variables réels sont obtenus à partir des variables biphasées

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.1.2 EQUATIONS ELECTRIQUES ET MAGNETIQUES DANS LE SYSTEME D'AXES (D, Q)

Les expressions des tensions statorique et rotorique suivant l'axe (d, q) sont données par [6], [7], [8], [11].

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_{coor} \cdot \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - \omega_{coor} \cdot \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_{coor} - \omega_r) \cdot \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - (\omega_{coor} - \omega_r) \cdot \phi_{dr} \end{cases} \quad (5)$$

Avec: ω_{coor} : Vitesse du système d'axe (d, q)

Les expressions des flux statoriques et rotoriques dans le système (d, q)

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M I_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M I_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (6)$$

2.2 CHOIX DU REFERENTIEL

Pour étudier la théorie des processus transitoires des machines électriques, il est recommandé de choisir un système d'axes de référence qui permet d'aboutir au système différentiel le plus simple possible, car le résultat final est indépendant du choix du système de coordonnées. On trouve que le calcul peut être plus ou moins complexe. A partir du système d'axe (d, q) on peut avoir d'autres axes qui sont des cas particuliers. Dans la suite, les composantes homopolaires sont supposées nulles [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]:

- Référentiel fixé par rapport au stator: $\omega_{coor} = 0$
- Référentiel fixé par rapport au rotor: $\omega_{coor} = \omega_r$
- Référentiel fixé par rapport au champ tournant $\omega_{coor} = \omega_s$

Cette dernière représentation qui fait correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales en régime permanent, la conception du contrôle vectoriel par orientation du flux nécessite ce choix et les modèles d'action dépendent de la position du référentiel par rapport aux divers axes de flux.

2.2.1 MODELE BIPHASE DE LA MADA LIE AU CHAMP TOURNANT

La précision dans la modélisation est essentielle pour des analyses efficaces et fiables. Le modèle biphasé offre une alternative plus flexible dans la modélisation des machines. Nous avons opté pour ce modèle afin d'obtenir une modélisation simple, fiable et précise. Les équations des tensions issues de ce modèle sont exprimées par:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \phi_{dr} \end{cases} \quad (7)$$

D'autre part, on peut déduire l'expression de la puissance électromagnétique de la machine dans le repère de Park après le calcul de la puissance instantanée comme suit [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]:

A travers les équations des tensions (7), nous avons déduire les expressions ci-dessous. Nous pouvons ainsi écrire l'expression de la puissance instantanée par:

$$P(t) = \frac{3}{2} [(V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs}) + (V_{dr} \cdot I_{dr} + V_{qr} \cdot I_{qr})] \quad (8)$$

En remplaçant V_{ds} , V_{qs} , V_{dr} et V_{qr} par leurs expressions, on aura l'équation:

$$P(t) = P_{js}(t) + P_{jr}(t) + P_{mgs}(t) + P_{mgr}(t) + P_{em}(t) \quad (9)$$

Les pertes Joule dans l'enroulement du stator et du rotor sont respectivement données par l'équation suivant:

$$\begin{cases} P_{js}(t) = \frac{3}{2} \cdot R_s \cdot (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) \\ P_{jr}(t) = \frac{3}{2} \cdot R_r \cdot (I_{dr}^2 + I_{qr}^2) \end{cases} \quad (10)$$

L'expression de l'énergie électromagnétique avec la source statorique et rotorique est illustrée par l'équation suivante:

$$\begin{cases} P_{mgs}(t) = \frac{3}{2} \cdot (\phi_{ds} \cdot I_{ds} + \phi_{qs} \cdot I_{qs}) \\ P_{mgr}(t) = \frac{3}{2} \cdot (\phi_{dr} \cdot I_{dr} + \phi_{qr} \cdot I_{qr}) \end{cases} \quad (11)$$

Pour déterminer la puissance électromagnétique de la machine, nous avons utilisé les expressions des flux magnétiques présentées dans l'équation (6), on obtient :

$$P_{em}(t) = \frac{3}{2} \cdot \omega \cdot (\phi_{ds} \cdot I_{qs} + \phi_{qs} \cdot I_{ds}) \quad (12)$$

Sachant que:

$$P_{em}(t) = \Omega_r \cdot C_{em} \text{ et } \omega_r = \Omega_r \cdot n_p$$

On déduit l'expression du couple électromagnétique:

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot n_p \cdot (\phi_{ds} \cdot I_{qs} + \phi_{qs} \cdot I_{ds}) \quad (13)$$

Par ailleurs, les puissances active et réactive statorique et rotorique sont données par:

$$\text{Puissance statorique: } \begin{cases} p_s = \frac{3}{2}(V_{ds}I_{ds} + V_{qs}I_{qs}) \\ Q_s = \frac{3}{2}(V_{qs}I_{ds} - V_{ds}I_{qs}) \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{Puissance rotorique: } \begin{cases} p_r = \frac{3}{2}(V_{dr}I_{dr} + V_{qr}I_{qr}) \\ Q_r = \frac{3}{2}(V_{qr}I_{dr} - V_{dr}I_{qr}) \end{cases} \quad (15)$$

2.3 MISE SOUS FORME D'EQUATION D'ETAT

Les équations (5) peuvent être disposées sous la forme de représentation d'état. On choisit pour vecteur d'état $x = [\phi_{ds}, \phi_{qs}, I_{dr}, I_{qr}]$, on trouve les équations d'état sous forme matricielle suit [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]:

$$\begin{cases} L \frac{dx}{dt} = A \cdot x + B \cdot U \\ y = C \cdot x \end{cases} \quad (16)$$

$$\text{Avec: } U = [V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}]^T, B = [I]_{4 \times 4}$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_s} & \omega_s & \frac{R_s M}{L_s} & 0 \\ -\omega_s & \frac{-R_s}{L_s} & 0 & \frac{R_s M}{L_s} \\ 0 & \frac{M}{L_s}(\omega_s - \omega_r) & -R_r & \sigma \cdot (\omega_s - \omega_r) \\ -\frac{M}{L_s}(\omega_s - \omega_r) & 0 & -\sigma \cdot (\omega_s - \omega_r) & -R_r \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\text{Et } L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{M}{L_s} & 0 & \sigma & 0 \\ 0 & \frac{M}{L_s} & 0 & \sigma \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\sigma = 1 - \left(\frac{M^2}{L_s L_r} \right) : \text{coefficient de dispersion.} \quad (19)$$

3 RESULTATS ET DISCUSSION

De nos jours, il existe toute une panoplie de logiciels utilisés pour l'étude des machines électriques. Afin de simuler le comportement de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), nous avons opté pour le logiciel MATLAB/SIMULINK.

La machine asynchrone à double alimentation dont les paramètres sont donnés en annexe, est alimentée par un réseau triphasé équilibré. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park.

Les figures 2 à 7, illustrent les résultats de la simulation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) concernant respectivement la vitesse, le couple, les courants et les flux, pour un démarrage à vide ($C_r = 0$). Dans le but d'obtenir des résultats plus précis des phénomènes électriques et thermiques au sein de la machine, nous avons court-circuité son rotor. À gauche on a les simulations du modèle de la machine par le réseau triphasé tel que, le rotor est court-circuité. A droite sont donnés les résultats de la simulation telle que, le rotor pour des raisons de stabilité est alimenté par une tension et une fréquence réduites (de l'ordre de 10%) par rapport aux grandeurs statoriques.

La simulation s'effectue au départ d'un démarrage à vide. On remarque que toutes les grandeurs de la machine ont un régime transitoire oscillant. La variation de la vitesse de rotation de la machine est illustrée à la fig. 2.

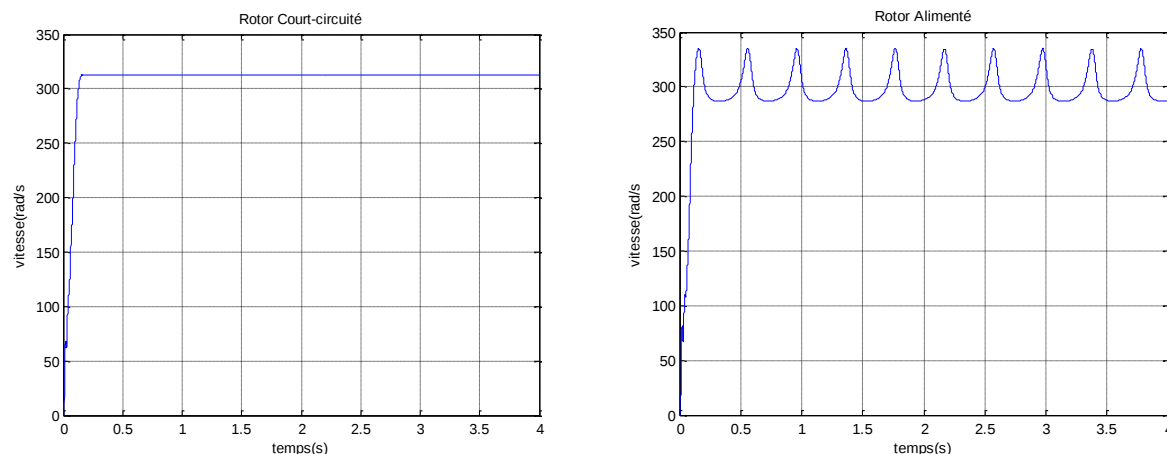


Fig. 2. La vitesse de rotation dans les deux cas (rotor alimenté et rotor court-circuité)

Lorsque le rotor de la machine est alimenté (figure à droite), on observe une oscillation de la vitesse de rotation qui varie entre 280 et 340 rad/s. Par contre, lorsque le rotor de la machine est court-circuité (figure à gauche), on constate que la vitesse de rotation se stabilise à une valeur proche de 315 rad/s après un temps égal à environs 0,2 s.

La fig.3 montre la variation du couple électromagnétique de la machine dans le cas du rotor alimenté et celui du rotor court-circuité.

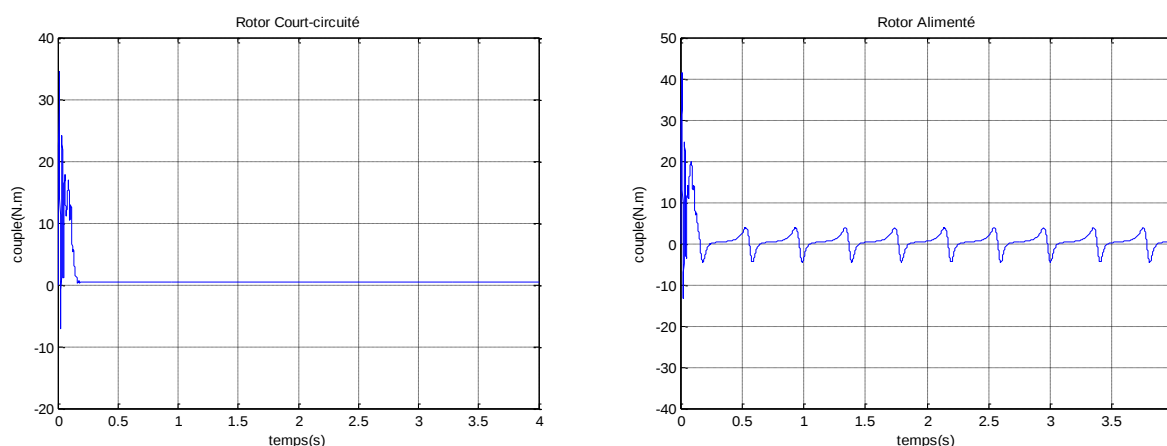


Fig. 3. Le couple électromagnétique dans les deux cas (rotor alimenté et rotor court-circuité)

On constate une stabilisation du couple électromagnétique à une valeur proche de 0 après 0,15 s, lorsque le rotor est court-circuité (figure à gauche). Lorsque le rotor est alimenté (figure à droite), le couple électromagnétique de la machine oscille entre 5 et - 5 N/m après 0,15s.

La variation du courant statorique de la machine dans le cas du rotor alimenté et celui du rotor court-circuité est illustrée par la fig.4.

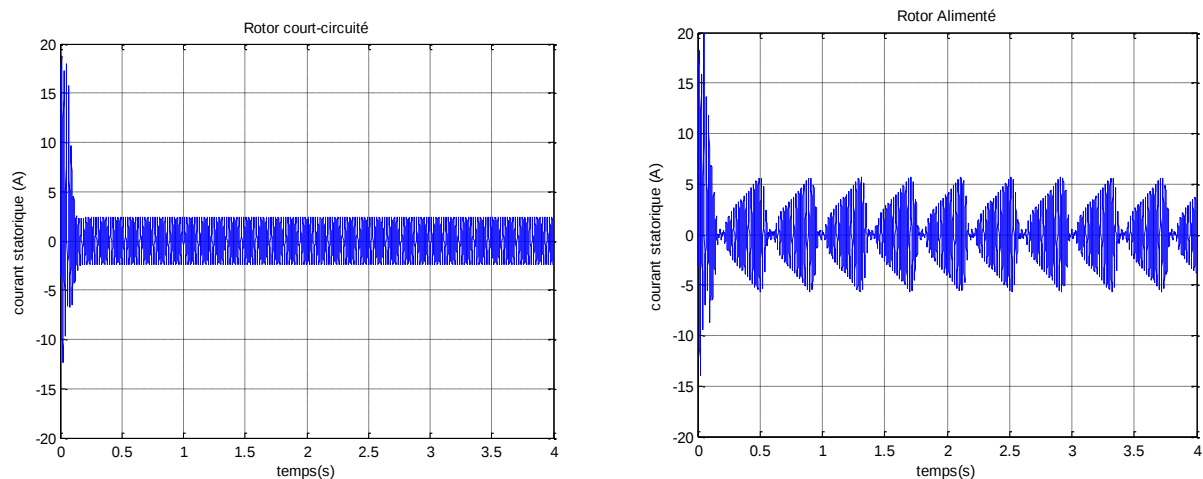


Fig. 4. Le courant statorique dans les deux cas (rotor alimenté et rotor court-circuité)

Le courant statorique en rotor court-circuité oscille autour de 0 après 0,2 s, par contre en rotor alimenté, le courant statorique varie entre 5 et -5 A après 0,20s.

La fig.5 présente la variation du courant rotorique de la machine dans le cas du rotor alimenté et celui du rotor court-circuité.

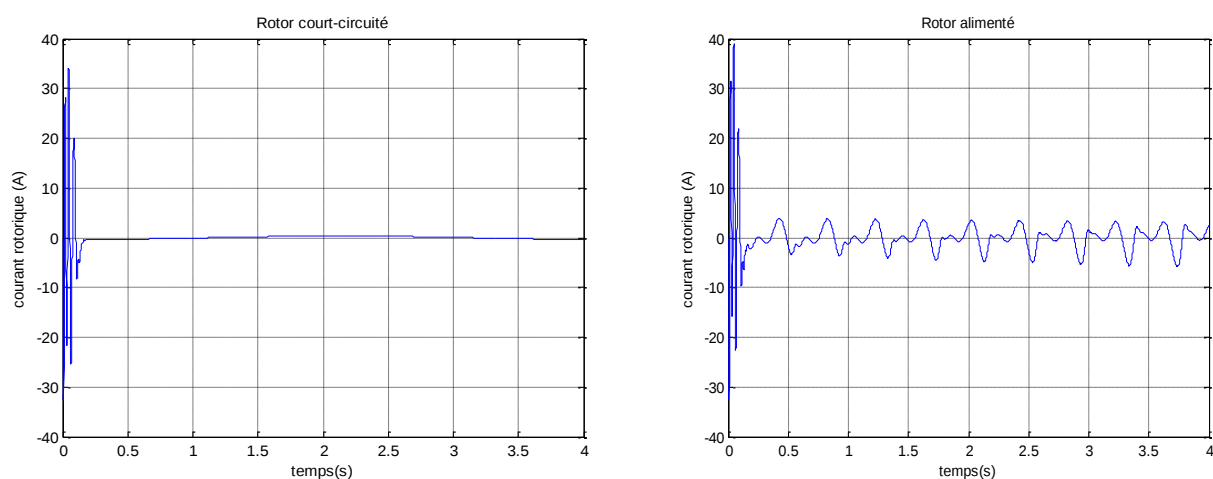


Fig. 5. Le courant rotorique dans les deux cas (rotor alimenté et rotor court-circuité)

Le courant rotorique en rotor court-circuité prend la valeur 0, par contre en rotor alimenté, le courant rotorique varie entre 5 et -5 A après 0,2s. On constate ainsi l'importance des courants statoriques et rotoriques pendant le démarrage, et après un temps égal à environs 0,2 s, les courants statoriques et rotoriques se stabilisent et prennent des valeurs proches de zéro.

La fig.6 montre la variation du flux statorique de la machine dans le cas du rotor alimenté et celui du rotor court-circuité.

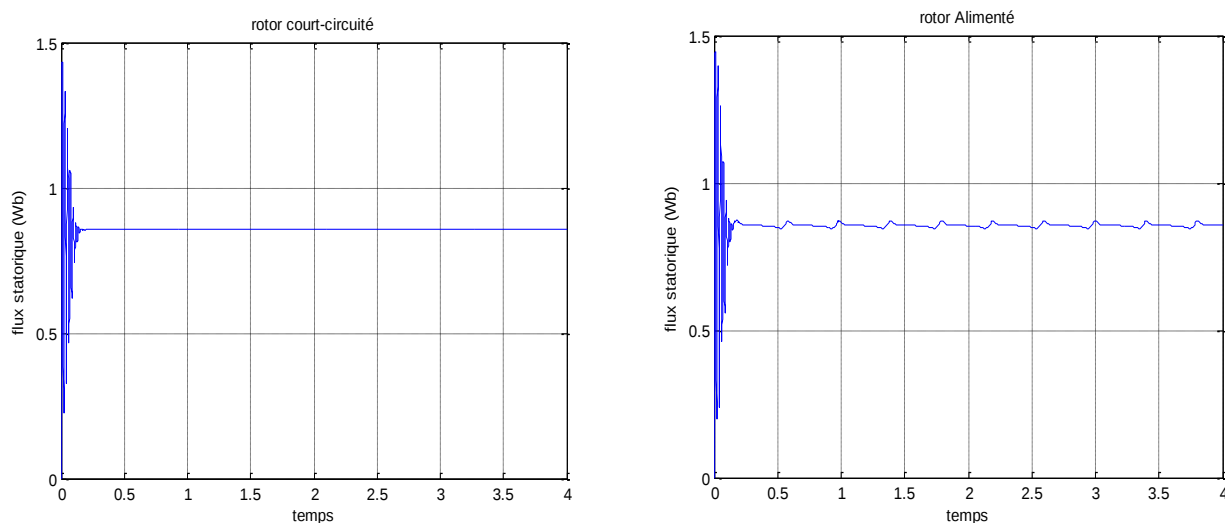


Fig. 6. Le flux statorique dans les deux cas (rotor alimenté et rotor court-circuité)

On constate que le flux statorique en rotor court-circuité et alimenté garde une valeur constante de 0,8 Wb après un temps de 0,2s. La variation du flux rotorique de la machine dans le cas du rotor alimenté et celui du rotor court-circuité est illustrée par la fig.7.

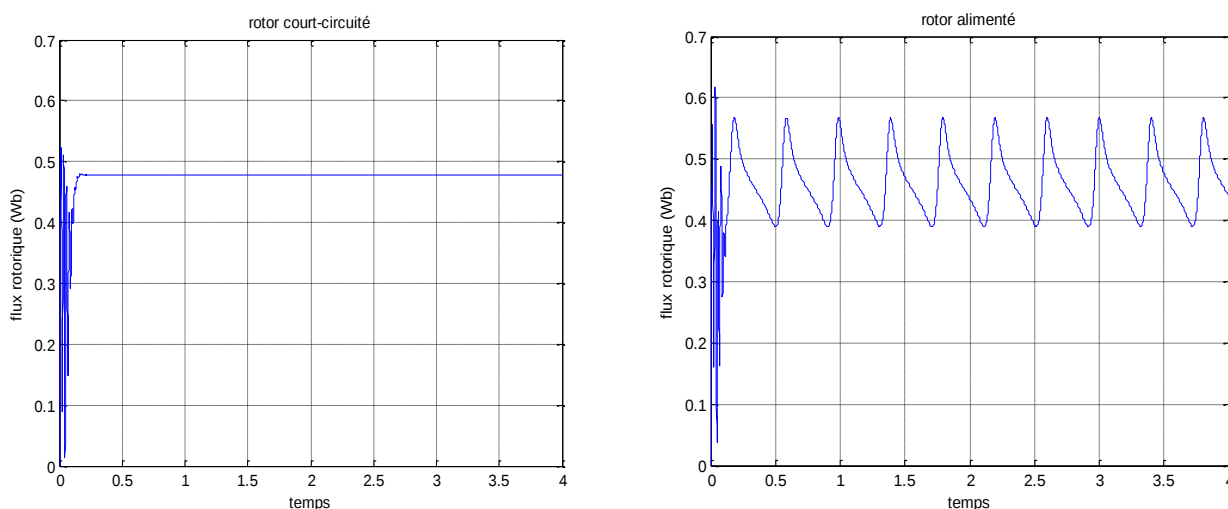


Fig. 7. Le flux rotorique dans les deux cas (rotor alimenté et rotor court-circuité)

A travers la fig.7, on remarque que le flux rotorique en rotor court-circuité atteint la valeur de 0,4 Wb après un temps de 0,1s, par contre dans le cas du rotor alimenté le flux rotorique varie 0,4 et 0,58Wb.

On remarque à travers ces résultats de simulation obtenus que toutes les grandeurs de la machine ont un régime transitoire oscillant. Il apparait clairement que la machine asynchrone à double alimentation se distingue par un caractère très instable en boucle ouverte. En effet, des perturbations trop exagérées sont apparues sur les différentes grandeurs de la machine depuis l'alimentation du rotor. Ces dernières sont dues à l'absence d'un contrôle strict de la position relative entre les deux forces magnétomotrices développées par les deux armatures de la machine. Afin de régler ce problème, le recours aux commandes bouclées devient indispensable.

4 CONCLUSION

A travers cet article, nous avons présenté le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park lié au champ tournant. Ce modèle a été développé dans le cadre de certaines hypothèses simplificatrices que nous devons respecter. Lors de cette modélisation, nous nous sommes attachés à développer un modèle en vue de la commande de la machine. Les résultats de simulation de modélisation de la machine asynchrone double alimentée montrent des problèmes de stabilité de ses paramètres en boucle ouverte, dans ce cas, le recours aux commandes bouclées, et spécialement les commandes de type vectoriel devient indispensable.

REFERENCES

- [1] Solution Green Power, 2024, Introduction aux éoliennes.
[en ligne] <https://www.solutiongreenpower.fr/les-energies-renouvelables/eoliennes/introduction-aux-eoliennes/>, consulté le 10/05/2024.
- [2] Connaissance des Energies, 2024, Energie éolienne: fonctionnement, avantages, chiffres clés et enjeux.
<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-eolienne>, consulté le 10/05/2024.
- [3] WindExchange, 2024, What is wind power ? <https://www.windexchange.energy.gov> [en ligne], consulté le 11/05/2024.
- [4] Robyns Benoît, Labrique Sophie, 2024, La Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).
<https://sites.uclouvain.be/elee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereEolienne/Mada/Mada.htm>, [en ligne], consulté le 12/05/2024.
- [5] Xavier Lagorce, 2010, Machine Asynchrone à Double Alimentation.
- [6] Ben kadem Somia, Ben mebarek Dalila, 2018. Commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production d'énergie éolienne, Mémoire De Master Université Ahmed Draïa Adrar, Algérie.
- [7] Khelfat L., Maataoui L., 2017, Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée, Mémoire De Master Université Badji Mokhtar- Annaba, Algérie.
- [8] ASMA B. A., 2016, Etude de la commande d'un système éolien base sur une GADA, Université Hadj Lakhdar - Batna.
- [9] Ben Nadji Hocine B. A., 2015, commande de la puissance active et réactive du GADA par la Méthode de mode glissant, El-Oued, Algérie.
- [10] Ben Slimane, Heithem Hamza Akrem, 2021, Commande d'un moteur asynchrone à double alimentation. Mémoire De Master, Université Badji Mokhtar – Annaba, Algérie.
- [11] Akkari Nadia, 2010, Contribution à l'alimentation de la Robustesse de la Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation, Thèse de Doctorat, Université de Batna, Algérie.
- [12] Maacha Rachid, 2011, Modélisation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation, mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Automatique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie.

NOTATIONS ET SYMBOLES:

Q_s : Puissance réactive du stator	C_s, C_r : Flux statorique et rotorique
Q_r : Puissance réactive du rotor	C_e : Couple électromagnétique
Q_{sr} : Somme des puissances réactive statorique et rotorique	C_{em} : Couple électromécanique
S_r : Puissance apparente maximale du rotor	C_r : Couple résistant
d : Indice de l'axe direct	ω_{coor} : Vitesse angulaire du repère biphasé (d , q)
q : Indice de l'axe en quadrature	ω : Vitesse angulaire de rotation du rotor
P_r : Puissance rotorique	ω_s : Vitesse angulaire de rotation du champ tournant
P_s : Puissance Statorique	a_r, b_r, c_r : Trois phases du rotor

ANNEXE A:

Données du moteur asynchrone à double alimentation

VALEURS NOMINALES:

- Puissance: 0.8 kW
- Tensions: 220 / 380 V
- Période: 50 Hz
- Courants: 5.8 / 3.2 A
- Connexion du rotor-étoile: 3×120 V - 4.1 A
- Vitesse: 1420 tr/min

PARAMÈTRE:

- R_s (Résistance du stator) = 11.98 Ω
- R_r (Résistance du rotor) = 0.904 Ω
- L_s (Inductance du stator) = 0.414 H
- L_r (Inductance de rotor) = 0.0556 H
- M (Inductance mutuelle) = 0.126 H
- Pôle: $P = 2$

CONSTANTES MÉCANIQUES:

- J (Inertie de rotor) = 0.01 kg.m²
- f (Coefficient de frottement) = 0.001

Caractérisation du complexe granitique d'Issia (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire) par la méthode de la fluorescence X portable (pXRF)

[Characterization of the Issia granitic complex (Central-West of Côte d'Ivoire) by the portable X-ray fluorescence (pXRF) method]

Brou Koffi Joseph¹, Teha Koffi Raoul¹, Kouassi Brice Roland², and Kouamelan Alain Nicaise²

¹Laboratoire de géologie, ressources minérales et énergétiques, UFR Sciences de la terre et des ressources minières, Université Félix Houphouët-Boigny (UFHB, Abidjan-Cocody), 22 B.P. 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

²Département de Géosciences, UFR Sciences Biologiques, Université Peleforon Gon Coulibaly de Korhogo, Côte d'Ivoire

Copyright © 2024 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 recent decades, the use of new field technologies used in the mining world and very little used in academia has become very important in several research disciplines. The recent development of portable field measuring instruments makes it possible to acquire a large amount of data without the need for costly sampling and analysis campaigns. As part of the «Geochemistry Geophysics Technology in Mining Exploration (T2GEM)» project, the acquisition of a portable X-ray fluorescence at the Petrology-Metallogeny laboratory at the STRM UFR of the Félix Houphouët-Boigny University (Côte d'Ivoire) has made it possible to promote the use of these new technologies as part of a scientific project whose research focus is the distribution of rare metals in columbian-tantaliferous placers in the Issia region. This study is therefore based on the contribution of x-ray fluorescence in the characterization of Nb-Ta placers in the Issia region by the analysis of rare metals in the surrounding formations. This technology provides real-time decision support for operational decisions in the field (exploration, mining), offers a cost-effective alternative to conventional laboratory analysis programs, and effectively addresses remote or difficult field conditions. The ability to rapidly collect large numbers of samples and replicate analyses facilitates the acquisition of higher data density.

KEYWORDS: Nb-Ta placers, Colombo-tantaliferous, New technologies.

RESUME: Au cours de ces dernières décennies, l'utilisation de nouvelles technologies de terrain employées dans le monde minier et très peu utilisées dans le milieu académique est devenue très importante dans plusieurs disciplines de recherche. Le développement récent d'instruments de mesures portatifs de terrain permet d'acquérir un grand nombre de données en s'affranchissant de campagnes d'échantillonnage et d'analyses coûteuses. Dans le cadre du projet « Technologie Géochimie Géophysique en Exploration Minière (T2GEM) », l'acquisition d'une fluorescence x portable au laboratoire de Pérologie-Métallogénie à l'UFR STRM de l'Université Félix Houphouët-Boigny (Côte d'Ivoire) a permis de promouvoir l'utilisation de ces nouvelles technologies dans le cadre d'un projet scientifique dont l'axe de recherche est la distribution des métaux rares dans les placers colombo-tantalifères dans la région d'Issia. Cette étude est donc basée sur l'apport de la fluorescence x dans la caractérisation des placers Nb-Ta dans la région d'Issia par l'analyse des métaux rares des formations environnantes. Cette technologie fournit une aide à la décision en temps réel pour les décisions opérationnelles sur le terrain (exploration, exploitation minière), offre une alternative économique aux programmes d'analyse de laboratoire classiques et traite efficacement les conditions de terrain éloignées ou difficiles. La capacité de collecter rapidement un grand nombre d'échantillons et de répliquer les analyses facilite l'acquisition d'une densité de données plus élevée.

MOTS-CLÉS: Placers Nb-Ta, Colombo-tantalifère, Nouvelles technologie.

1 INTRODUCTION

Cet article passe en revue l'importance de la spectrométrie de fluorescence X portable, ou XRF portable (pXRF) obtenue à l'Université Félix Houphouët Boigny d'Abidjan grâce au projet T2GEM. Ce projet se propose de développer l'utilisation de nouvelles technologies, employées

dans le monde minier, peu exploitées dans le monde académique, et absentes jusqu'à ce jour des laboratoires publics en Côte d'Ivoire. Il examine également son potentiel et ses limites actuels, et comment tirer le meilleur parti de cette technologie flexible tout en évitant les écueils courants. La capacité des premiers instruments à analyser de manière fiable certains éléments chimiques tels que le Pb, le Zn, le Cu et l'As a prévalu leur utilisation sur les sites contaminés ainsi que dans les zones minières [1]. Dans les deux applications, ils ont été utilisés comme outil de dépistage et de cartographie rapide. Dans le secteur minier, ils ont d'abord été utilisés pour l'exploration régionale, et les demandes de reconnaissance des teneurs plus tard. Dans les études environnementales, ils ont d'abord été utilisés pour des enquêtes de portée sur le sol et les sédiments. Cependant, leurs capacités d'identification qualitative ont rapidement été utilisées pour la gestion des déchets [2].

La pXRF étant avérée être l'une des techniques de terrain les plus pratiques, permettra donc de caractériser chimiquement les formations granitiques de la région d'Issia dont leur mise en place serait à l'origine des métaux rares des placers alluvionnaires, colluvionnaires et éluvionnaires [3-5,6]. Il s'agira donc dans cette étude de faire ressortir les limites et contraintes d'application selon l'usage et définir des critères d'applicabilité de la mesure des métaux et autres minéraux des granites et pegmatites hôtes à l'aide de la spectrométrie de fluorescence X portable.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 PRESENTATION DU FPXRF NITON XL3T GOLDD+

2.1.1 PRINCIPE

La spectrométrie de fluorescence X est une technique d'analyse élémentaire non destructrice de l'échantillon. Le principe consiste à irradier l'échantillon pour que les atomes ainsi ionisés émettent un rayonnement de fluorescence dans le domaine des rayons X (Fig. 1A). Un photon est émis depuis la source (générateur de rayons X). Ce photon chargé d'énergie rencontre un électron de la couche K par exemple. Ce dernier est éjecté de l'atome qui se trouve alors dans un état instable. Un électron de couche L va donc descendre sur la couche K. Ce réarrangement amène un surplus d'énergie qui se traduit par l'émission d'un photon X. La fluorescence X se caractérise donc par l'émission de photons X secondaires dont l'énergie peut être reliée à un élément. Les spectres sont obtenus par mesure de l'énergie de chaque photon de fluorescence capté (Fig. 1B). Plus le détecteur récupère de photon, plus la concentration est élevée.

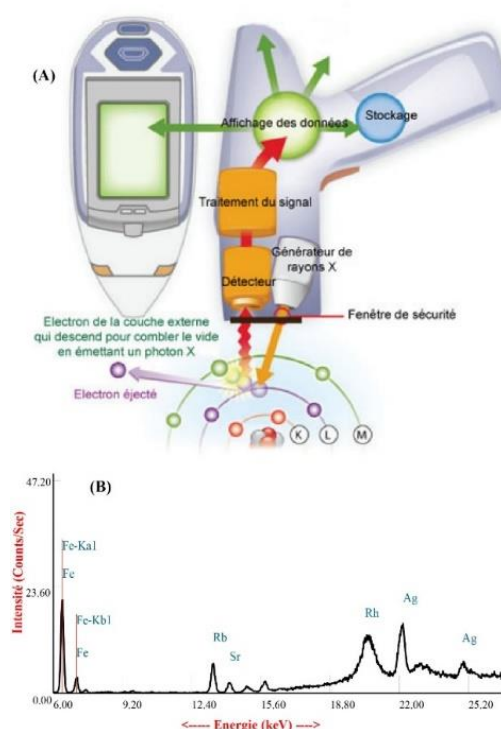


Fig. 1. A-Principe du spectromètre portable par fluorescence X (source Niton). B-Spectre d'émission de fluorescence X d'un échantillon de roche (poudre, IS24)

2.1.2 APPAREIL DE MESURE

Le spectromètre de fluorescence X portable (FPXRF: Field Portable X-Ray Fluorescence) utilisé pour cette étude est le Niton XL3t GOLDD+ (Fig. 2A). Cet appareil de type pistolet permet le transport et l'utilisation rapide sur le site afin de déterminer rapidement la teneur en élément

d'un sol ou d'un échantillon de roche (Fig. 2B). Un dispositif permet d'utiliser l'appareil de type pistolet en mode laboratoire en le plaçant sur un poste de mesure démontable. L'appareil se fixe alors sous le poste et l'échantillon est placé dessus, sous un capot plombé; l'analyse ne peut débuter que si le capot est correctement fermé. Le lancement des analyses peut alors être piloté depuis l'ordinateur. Le système de sécurité prévoit deux gâchettes qui doivent être maintenues enclenchées durant toute l'analyse en mode terrain, et un bouton poussoir près de la fenêtre d'analyse (Fig. 2D) qui confirme que l'échantillon obstrue bien la fenêtre d'analyse. En mode laboratoire, un capot plombé assure la protection des opérateurs (Fig. 2C).

L'appareil de type pistolet est un analyseur de terrain portatif léger (1,4 kg avec bactérie) à fluorescence X permettant des mesures sur sites rapides, précises et non destructives. (Fig. 2A). Les résultats obtenus sont présentés sous forme graphique (spectre RX) ou sous forme de concentrations et extrait avec le logiciel Excel à l'aide d'un ordinateur par un port USB et série ou par Bluetooth. Plus de 10000 mesures peuvent être stocké dans l'appareil (spectres et images compris).

La gamme d'analyse quantitative de l'appareil va, du plus léger au plus lourd, du magnésium à l'uranium. Le programme fourni permet la mesure de plus de 29 éléments allant du magnésium (Mg) à l'uranium (U) (Fig. 2E) avec quatre types de filtres:

- Main « éléments lourds »: Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Ag, Cd, Sb, Ba, Hg et Pb
- Low
- High
- Light « éléments légers »: Al, Ca, Si et Mg

Ces filtres sont repartis en deux types de calibrations à savoir:

- Calibration Mining qui utilise tous les quatre filtres et qui se subdivise en deux sous modes: Hf/Ta et Ni/Cu et les concentrations obtenues sont exprimées en %;
- Calibration Soil qui utilise uniquement trois filtres (le filtre light n'est pas utilisé) et les concentrations sont obtenues en ppm.

Le temps d'acquisition pour chaque filtre d'analyse est de 30s. La fenêtre d'analyse est de 3 et 8 mm de diamètre pour le mode mining et 8 mm pour le mode soil (Fig. 2B).

Les échantillons peuvent se présenter sous forme compacte ou en poudre. Pour des mesures *in situ* ou *on site*, il n'existe pas de contrainte de taille de l'échantillon. En revanche, en mode laboratoire, la taille de l'échantillon est limitée par la dimension de la chambre de mesure. Les rayonnements sont émis à travers une fenêtre de mesure en polypropylène lorsque le tube est en fonctionnement. L'excitation de l'échantillon se fait grâce à une unité électronique renfermant un générateur électrique de rayons X (pas de source radioactive). La tension maximale du tube est de 50kV.

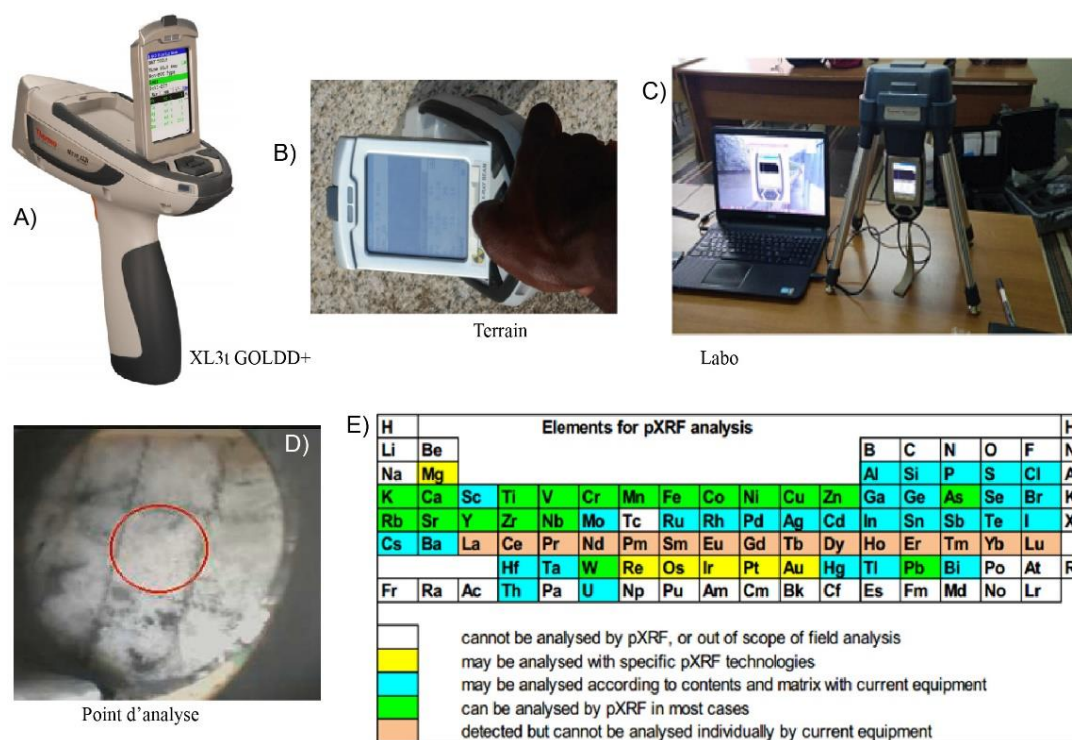


Fig. 2. A, B, C-Photographies du spectromètre portable de fluorescence x. D-Point d'analyse du pXRF. E- Eléments accessibles par les analyses FPXRF

2.2 INTERFERENCES

Les interférences rencontrées en spectrométrie de fluorescence X sont connues depuis longtemps [7-10], les principales sont dues aux:

- Effets physiques de la matrice (taille des particules, homogénéité, effet de surface);
- Humidité et porosité de l'échantillon;
- Effets chimiques de la matrice (diminution ou augmentation de l'intensité d'une raie d'un élément causée par la présence d'un autre élément);
- Interférences entre les raies (interférence $K\alpha/K\beta$) et
- Interférences entre les raies K/L , K/M et L/M .

Le logiciel intégré dans le spectromètre de fluorescence X tient compte des interférences entre les différents éléments chimiques pour le calcul des teneurs mais il ne permet pas toujours de toutes les compenser et les teneurs de certains de ces éléments sont sous ou surestimées par rapport aux teneurs réelles. Dans le cas des interférences entre les raies K/L , K/M et L/M , celles-ci apparaissent quand, par exemple, la raie $K\alpha$ d'un élément 1 chevauche la raie $L\alpha$ d'un autre élément 2 (Fig. 3). Pour pouvoir déterminer la concentration exacte des éléments 1 et 2, il est possible d'utiliser les raies $K\beta$ et $L\beta$ de ces mêmes éléments. En utilisant des raies de moindre intensité, l'appareil de mesure perd en sensibilité.

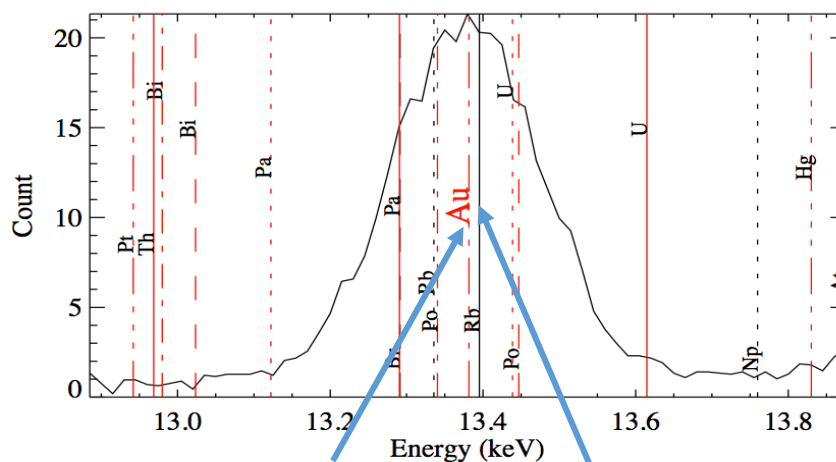


Fig. 3. Possible interférence entre Au, Rb et U vers 13.4 keV

2.3 UTILITE DE LA PXRF SUR LE TERRAIN

Sur le terrain comme étude préliminaire, nous analysons à la pXRF les minéraux des granites et pegmatites. Les analyses étaient plus portées sur les micas d'autant plus que ces minéraux sont assez de grande taille (1 à 3 mm dans les granites, plusieurs centimètres dans la pegmatite) et aussi du fait que les plus fortes teneurs en certains éléments caractéristiques (Nb et Ta) des granites fertiles étaient obtenues par les analyses de ces minéraux. Les micas étant donc d'excellents traceurs des minéralisations en Nb-Ta (lorsque la roche n'est pas minéralisée en oxydes de Nb-Ta, ces métaux sont concentrés dans les micas), nous avons ciblé les analyses pXRF sur les micas. A la pXRF, la zone d'analyse de 8 et 3 mm de diamètre ne permet pas d'analyser un minéral en particulier, mais un mélange de minéraux. Si la proportion de micas dans l'analyse est connue, même approximativement, il est possible d'obtenir des analyses pXRF représentatives des micas, surtout pour certains éléments comme Nb-Ta qui ne sont présents très souvent que dans les micas. Dans les placers, des analyses ont été également faites sur les oxydes de Nb-Ta prélevés et cela nous a permis de faire la distinction entre la colombite et la tantalite.

2.4 TECHNIQUE ANALYTIQUE DE ROCHE AU LABORATOIRE ET CARTOGRAPHIE GEOCHIMIQUE

Cette technique a pour objectif d'arriver à déterminer la composition chimique d'un échantillon de roche sans le broyer au préalable.

2.4.1 PREPARATION DE L'ÉCHANTILLON

Au laboratoire, sur les échantillons de roches prélevés, plusieurs travaux sont effectués:

- Réalisation d'une grille, au crayon à papier au criterium (mine la plus fine possible) sur le sucre (Fig. 4): sur les sucres de roches coupés pour la confection de lames minces, nous traçons des grilles de mailles 3x3 mm (Fig. 4A) Cette grille servira de repère pour les mesures FPXRF (Field Portable X-Ray Fluorescence).

- La grille est prise en photo. Noter sur la photographie les lignes avec des lettres majuscules (A, B, C, D, etc...), et les colonnes avec des chiffres. Chaque mesure FPXRF doit pouvoir être identifié avec un code unique dans l'ordre lettre+nombre (ex: A4, pour 1^{ère} ligne 4^{ème} colonne) (Fig. 4A).
- Réalisation des mesures FPXRF: sur chaque maille de la grille, des mesures à la pXRF sont effectuées afin de mieux apprécier la distribution des éléments chimiques à l'échelle du sucre de roche. C'est ce qui permet également d'apprécier la distribution de Ta et de Nb dans les minéraux porteurs tels que les micas, l'ilménite, le rutile. Chaque mesure est enregistrée avec sa position dans le champ « SAMPLE » lors de la saisie des paramètres d'acquisition.

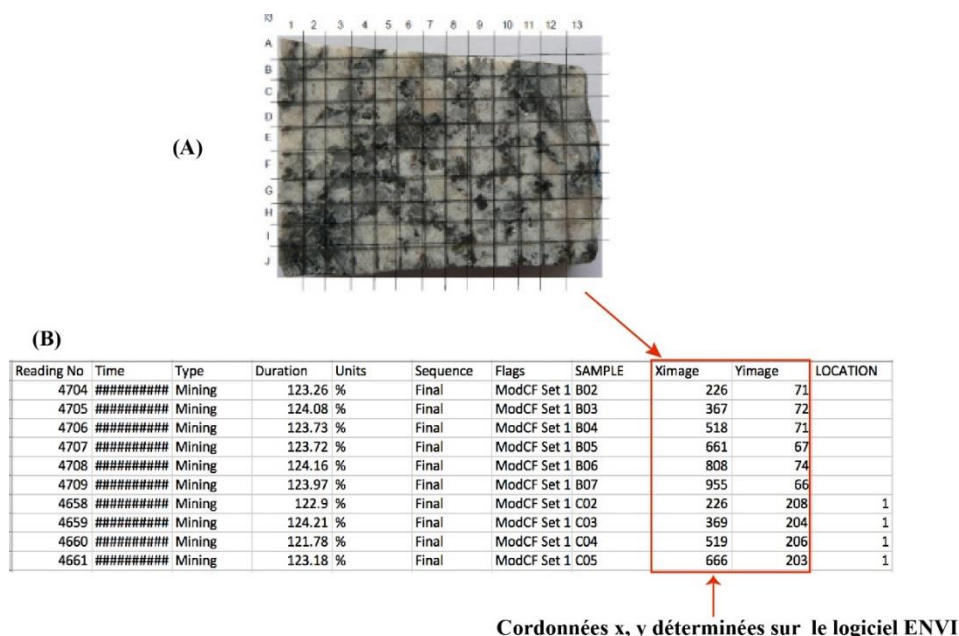


Fig. 4. A- Grilles de mailles 3x3 mm sur le sucre de roche. B-Présentation du fichier FPXRFgrid.csv

2.4.2 TRAITEMENT INFORMATIQUE DES MESURES

- Exportation des mesures FPXRF au format csv. On vérifie que la colonne « SAMPLE » comporte bien la position des mesures notées avec une lettre et un nombre. Ce fichier est nommé ici **FPXRFgrid.csv** pour pouvoir y faire référence dans la suite du document.
- Afin de réaliser une reprojexion des données FPXRF précise sur la grille tracée manuellement, et donc irrégulière, il est nécessaire de prendre les coordonnées du centre de chaque case de la grille. Pour cela, on procède de la manière suivante:
 - Découper la photo du sucre avec la grille de manière à couvrir la zone de mesure. Il est possible d'inclure une petite marge, de manière à être sûr de bien couvrir toute la zone de mesure FPXRF. Cette photo doit être enregistrée au format jpeg. On la nomme ici **grid.jpg** pour y faire référence dans la suite du document.
 - Ouvrir la grille sous un logiciel de traitement d'image (ENVI, ou SNAP) et déterminer les coordonnées x et y en pixel du centre de chaque case (Fig. 4B).
 - Ajouter deux colonnes au fichier FPXRFgrid.csv après SAMPLE.
- Exécution du programme FPXRFgrid.py sur Python faisant appel aux routines stockées dans le fichier FPXRF.py.
- Les fenêtres contenant les reprojexion des concentrations chimiques sur l'image du sucre s'ouvre. Les graphiques peuvent être sauvegardés selon différents format (jpg, png, pdf, etc...).

3 RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 CARTOGRAPHIE DES ELEMENTS CHIMIQUES A L'ECHELLE DU SUCRE DE ROCHE

Comme expliqué dans la partie méthodologie, les analyses effectuées sur les mailles réalisées sur les sucres de roche, permettent d'obtenir les teneurs des différents éléments chimiques à l'échelle du sucre, de cartographier la distribution des éléments en trace (Fig. 5) et de les corrélérer avec la minéralogie. Cette technique permet donc à un faible coût de se faire une idée de la répartition des teneurs des éléments chimiques

dans la roche à l'échelle du sucre de roche. Ce qui nous permet de localiser au préalable les endroits où un élément intéressant pourrait se situer. C'est l'exemple du Nb et Ta dont les minéraux hôtes sont attribués aux micas.

Sur les grilles réalisées sur les sucres de roches (granites), ont été effectuées au total 86 mesures pXRF (Tableau 1). Les échantillons ayant servis d'essai sont les granites IS03 et IS24. La moyenne des 86 analyses pour chaque élément a été comparée par les teneurs de ces éléments obtenues par ICP-MS. Les résultats sont ainsi présentés sous forme d'histogramme (Fig. 6). Ainsi à l'aide des diagrammes de corrélation (Fig. 6), nous constatons que les analyses roches totales (ICP-MS) des granites sont comparables à la moyenne des analyses pXRF réalisées sur des sucres de ces mêmes échantillons.

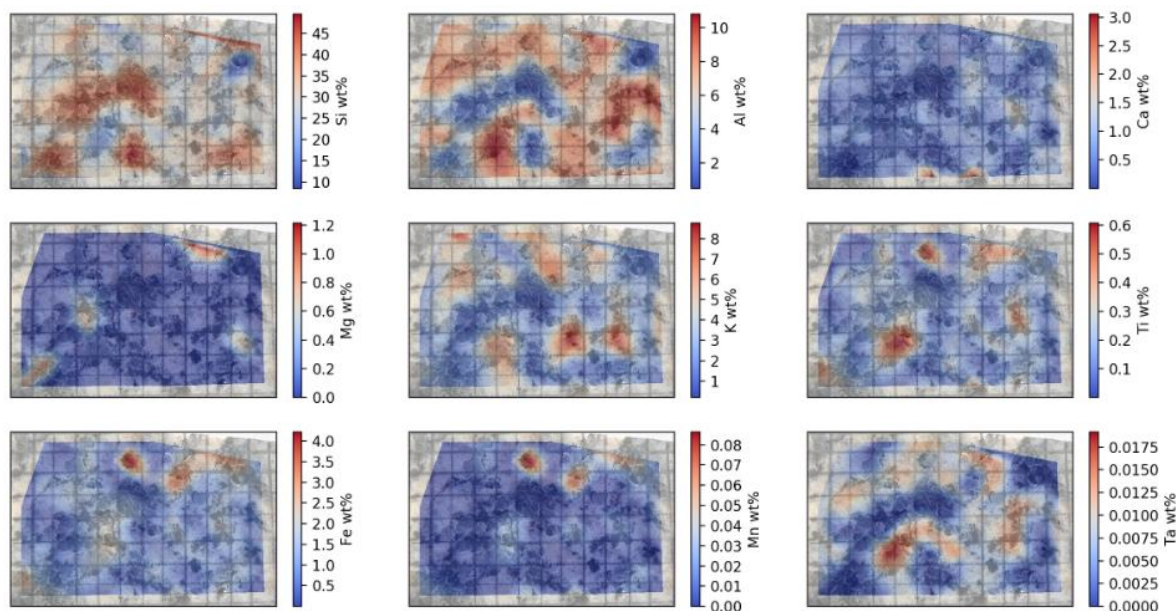


Fig. 5. Cartographie réalisée à l'échelle d'un sucre de granite montrant la distribution des éléments chimiques (granite IS03)

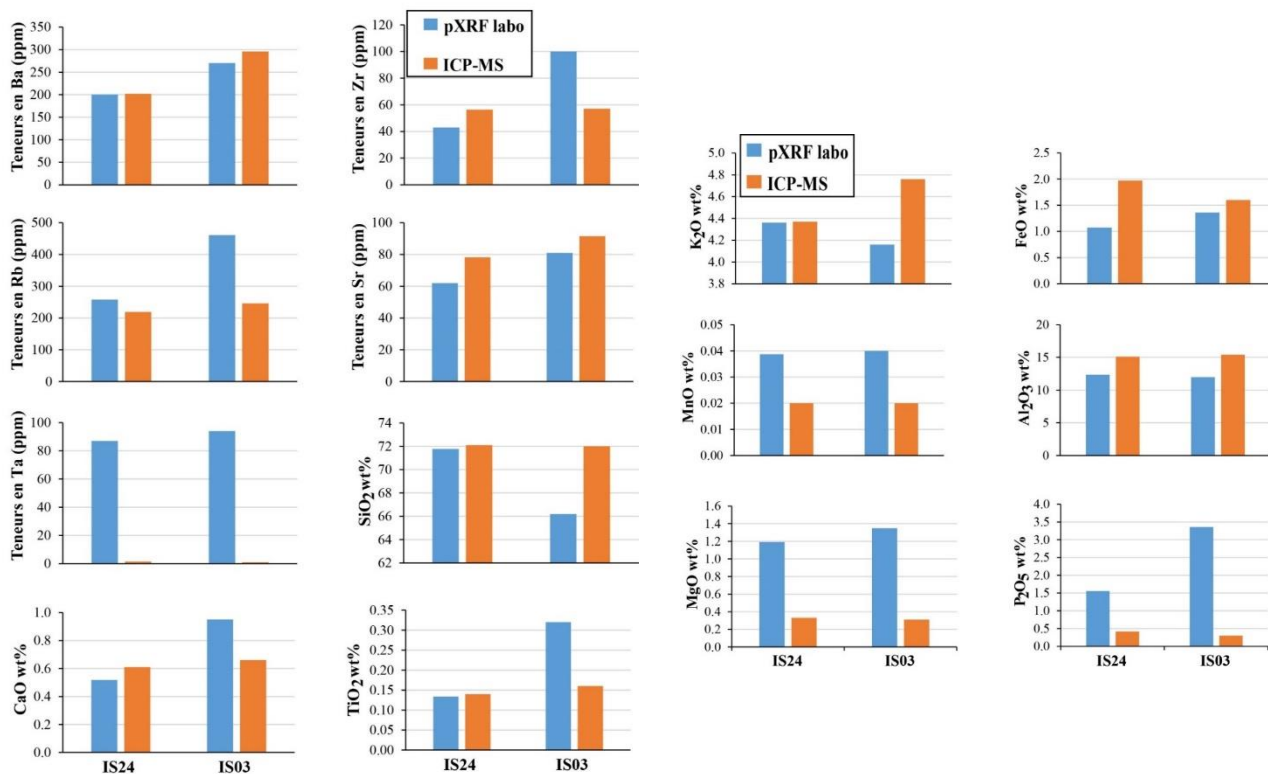


Fig. 6. Comparaison entre la moyenne de 86 analyses FPXRF réalisées sur des sucres de roches avec l'analyse roche totale ICP-MS des mêmes échantillons (IS24, IS03)

Tableau 1. Moyenne de 86 analyses FPXRF réalisées sur les sucres de granites et résultats des analyses ICP-MS

		IS24	IS03
SiO ₂	pXRF	71,77	66,19
	ICP-MS	72,1	72
Al ₂ O ₃	pXRF	12,34	12
	ICP-MS	15,1	15,4
CaO	pXRF	0,52	0,95
	ICP-MS	0,61	0,66
K ₂ O	pXRF	4,36	4,16
	ICP-MS	4,37	4,76
FeO	pXRF	1,07	1,36
	ICP-MS	1,97	1,6
MgO	pXRF	1,19	1,35
	ICP-MS	0,33	0,31
MnO	pXRF	0,04	0,04
	ICP-MS	0,02	0,02
TiO ₂	pXRF	0,13	0,32
	ICP-MS	0,14	0,16
P ₂ O ₅	pXRF	1,56	3,36
	ICP-MS	0,42	0,3
Ba	pXRF	200	270
	ICP-MS	202	296
Zr	pXRF	43	100
	ICP-MS	56,4	57,1
Sr	pXRF	62	81
	ICP-MS	78,2	91,6
Rb	pXRF	258	461
	ICP-MS	219,2	246,1
Ta	pXRF	87	94
	ICP-MS	1,5	1

3.2 FIABILITE DES ANALYSES PXRF PAR COMPARAISON AUX ANALYSES ROCHE TOTALE PAR ICP-MS

Afin de vérifier la fiabilité des analyses pXRF, nous avons sélectionné 13 échantillons de poudre de granites qui ont été analysés par la méthode de l'ICP-MS au bureau Veritas à Vancouver au Canada [4]. Sur ces échantillons, ont été effectuées au laboratoire des analyses pXRF en mode soil et mining (3 mm et 8 mm; Tableau 2). Ce type d'exercice nous permet ainsi de vérifier la fiabilité de la méthode pXRF. Les résultats des analyses ainsi obtenus sont présentés sous forme d'histogramme (Fig. 7 et 8).

Les histogrammes de certains éléments montrent que les teneurs en certains éléments données par les analyses pXRF sont satisfaisantes. En effet les teneurs en ces éléments sont très proches de leurs valeurs obtenues par ICP-MS. Il s'agit de Ba, Rb, Sr, Fe, Ca, K, Si, Ti et Mn. On constate à travers ces histogrammes que le mode soil c'est-à-dire la calibration qui permet de quantifier la majorité des éléments en traces permet d'obtenir des teneurs plus satisfaisantes en certains éléments tels que Ba, Zr, Rb et Sr par rapport au mode mining. Le mode mining de diamètre 3 mm donne des teneurs en Fe, Ca et K plus proches de celles obtenues par ICP-MS, par contre les teneurs satisfaisantes en Si sont données par le mode mining 8 mm. Il apparaît donc nécessaire pour des analyses pXRF de tenir compte de ces critères. On peut cependant constater que certains éléments présentent des teneurs sous-estimées ou surestimées lorsqu'ils sont analysés par pXRF. Les teneurs obtenues par fluorescence X sur les poudres sont sous-estimées de 25 % pour Al et surestimées entre 25 et 33 % pour P. Concernant Mg, les teneurs sont surestimées d'environ 70 % par les analyses pXRF sur les granites alors que sur la poudre de la granodiorite (DAL06) elles sont sous-estimées d'environ 48 %. Ce qui nous permet de dire ainsi que ces imprécisions dans l'acquisition des données pXRF de Mg sont dues aux phénomènes d'interférences. En effet, Mg n'est pas correctement quantifié à cause de sa faible teneur mais également à cause du fait qu'il émet dans de mêmes longueurs d'ondes que As, Ge et Se qui ont tendance à créer des interférences pendant l'analyse. Le Ta également est surestimé par les analyses pXRF à cause de sa faible teneur dans les échantillons analysés mais également de l'abondance de certains éléments tels que Si et Rb avec qui il interfère.

Tableau 2. Analyses FPXRF et ICP-MS réalisées sur les poudres de granites d'Issia

W%		IS03	IS14	IS24	IS25	DAL20	IS18	DAL05	DAL09	DAL11	DAL12	DAL13	DAL15	DAL06
SiO ₂	Min_8	71,19	72,69	71,22	73,1	72,38	70,26	71,84	69,23	70,69	71,7	73,54	72,38	63,41
	Min_3	68,29	70,74	70,04	69,8	69,05	68,78	71,03	67,43	69	70,01	70,06	69,05	61,53
	Rt	72	72,6	72,1	72,9	71,9	71,9	74,8	72,7	73,9	73	73,5	71,9	64
Al ₂ O ₃	Min_8	11,68	11,19	11,29	11,34	11,75	11,04	10,14	10,85	10,9	11,25	11,63	11,75	11,72
	Min_3	10,72	10,34	10,61	10,98	10,59	10,62	9,82	10,27	9,99	10,42	10,51	10,59	10,97
	Rt	15,4	14,4	15,1	14,5	15	15,1	13,7	14,9	14,8	14,6	14,6	15	14,6
K ₂ O	Min_8	4,27	4,34	3,94	4,53	4,3	4,15	3,88	3,8	3,86	3,32	4,57	4,3	2,11
	Min_3	4,69	4,76	4,3	5	4,69	4,61	4,36	4,18	4,21	3,62	4,99	4,69	2,21
	Rt	4,76	4,76	4,37	4,88	4,81	4,67	4,33	4,22	4,44	3,63	5,13	4,81	2,22
CaO	Min_8	0,6	0,65	0,56	0,55	0,58	0,62	0,73	1,09	0,64	1,18	0,54	0,58	4,29
	Min_3	0,62	0,67	0,57	0,57	0,58	0,64	0,78	1,11	0,62	1,2	0,53	0,58	4,53
	Rt	0,66	0,71	0,61	0,61	0,63	0,7	0,81	1,19	0,68	1,26	0,59	0,63	4,47
FeO	Min_8	1,41	1,71	1,76	1,46	1,54	1,55	1,18	1,43	0,91	1,48	1,29	1,54	4,76
	Min_3	1,51	1,81	1,87	1,56	1,66	1,69	1,23	1,54	0,98	1,6	1,33	1,66	5,06
	Rt	1,6	1,94	1,97	1,68	1,72	1,8	1,38	1,64	1,06	1,75	1,47	1,72	5,24
MnO	Min_8	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,07
	Min_3	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,08
	Rt	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,09
MgO	Min_8	0,81	0,69	0,82	0,72	0,72	0,72	0,65	0,7	0,69	0,64	0,7	0,72	2,38
	Min_3	1,11	1,04	1,12	1,25	0,92	1,29	1,08	1,01	0,92	1,07	1,01	0,92	2,31
	Rt	0,31	0,34	0,33	0,21	0,34	0,36	0,13	0,37	0,15	0,39	0,21	0,34	4,61
TiO ₂	Min_8	0,12	0,12	0,11	0,06	0,13	0,17	0,03	0,16	0,05	0,17	0,09	0,13	0,43
	Min_3	0,12	0,12	0,11	0,06	0,13	0,18	0,04	0,17	0,05	0,18	0,09	0,13	0,42
	Rt	0,16	0,15	0,14	0,07	0,17	0,23	0,06	0,19	0,08	0,22	0,12	0,17	0,48
P ₂ O ₅	Min_8	0,41	0,5	0,59	0,66	0,52	0,54	0,18	0,19	0,15	0,15	0,18	0,52	0,55
	Min_3	0,38	0,5	0,58	0,63	0,5	0,5	0,21	0,21	0,16	0,17	0,16	0,5	0,56
	Rt	0,3	0,4	0,42	0,51	0,41	0,4	0,11	0,08	0,1	0,07	0,1	0,41	0,4

Min_8= mode mining à 8 mm; Min_3= mode mining à 3 mm; Rt= Roche totale

Tableau 3. (Suite)

ppm		IS03	IS14	IS24	IS25	DAL20	IS18	DAL05	DAL09	DAL11	DAL12	DAL13	DAL15	DAL06
Ba	Min_8	140	156,67	98	98,33	135	185	237,14	390	178	330	216,67	135	902,5
	Min_3	140	147,5	108	112	150	156	254	400	186	340	228	150	930
	Soil	204,08	183,01	100,83	112,18	201,44	316,48	347,19	678,97	303,78	548,13	300	201,44	1408,53
	Rt	296	312	202	223	258	301	453	655	279	617	399	258	1586
Zr	Min_8	50	60	50	30	60	100	80	102	32	130	60	60	205
	Min_3	58	65	50	34	68	108	96	105	38	142	70	68	232
	Soil	57,48	67,87	53,58	35,82	69,29	118,7	88,69	111,23	37,2	143,09	67,55	69,29	217,72
	Rt	57,1	71,2	56,4	36,4	71,1	109,3	99,7	114,1	37,9	147	75,2	71,1	228,3
Sr	Min_8	60	70	50	60	60	60	144,29	160	80	170	78,33	60	842,5
	Min_3	70	80	54	70	70	66	160	175	88	184	80	70	912
	Soil	89,49	103,15	70,21	87,44	87,39	83,08	200,52	219,93	111,00	231,72	104,54	87,39	1188,89
	Rt	91,6	107,6	78,2	89,9	93,2	79,4	223	242	121	255	113	93,2	1272
Rb	Min_8	280	243,33	240	308,33	305	442,5	140	226	248	178,57	270	305	177,5
	Min_3	288	255	254	326	318	464	152	230	262	186	288	318	188
	Soil	262	229,89	224,61	284,96	286,54	414,79	137,17	211,57	230,12	168,00	253,92	286,54	168,46
	Rt	246,1	213,8	219,2	265,9	286,1	390,7	141,5	216,8	231,2	173,3	266,5	286,1	170,9
Ta	Min_8	40	31,67	42	41,67	46,25	35	42,86	50	52	48,57	58,33	46,25	42,5
	Min_3	76	72,5	70	74	68	92	68	65	84	82	88	68	70
	Soil													
	Rt	1	1,1	1,5	11,6	1,1	0,6	0,3	0,8	1	0,6	1,2	1,1	0,6

Soil= mode soil

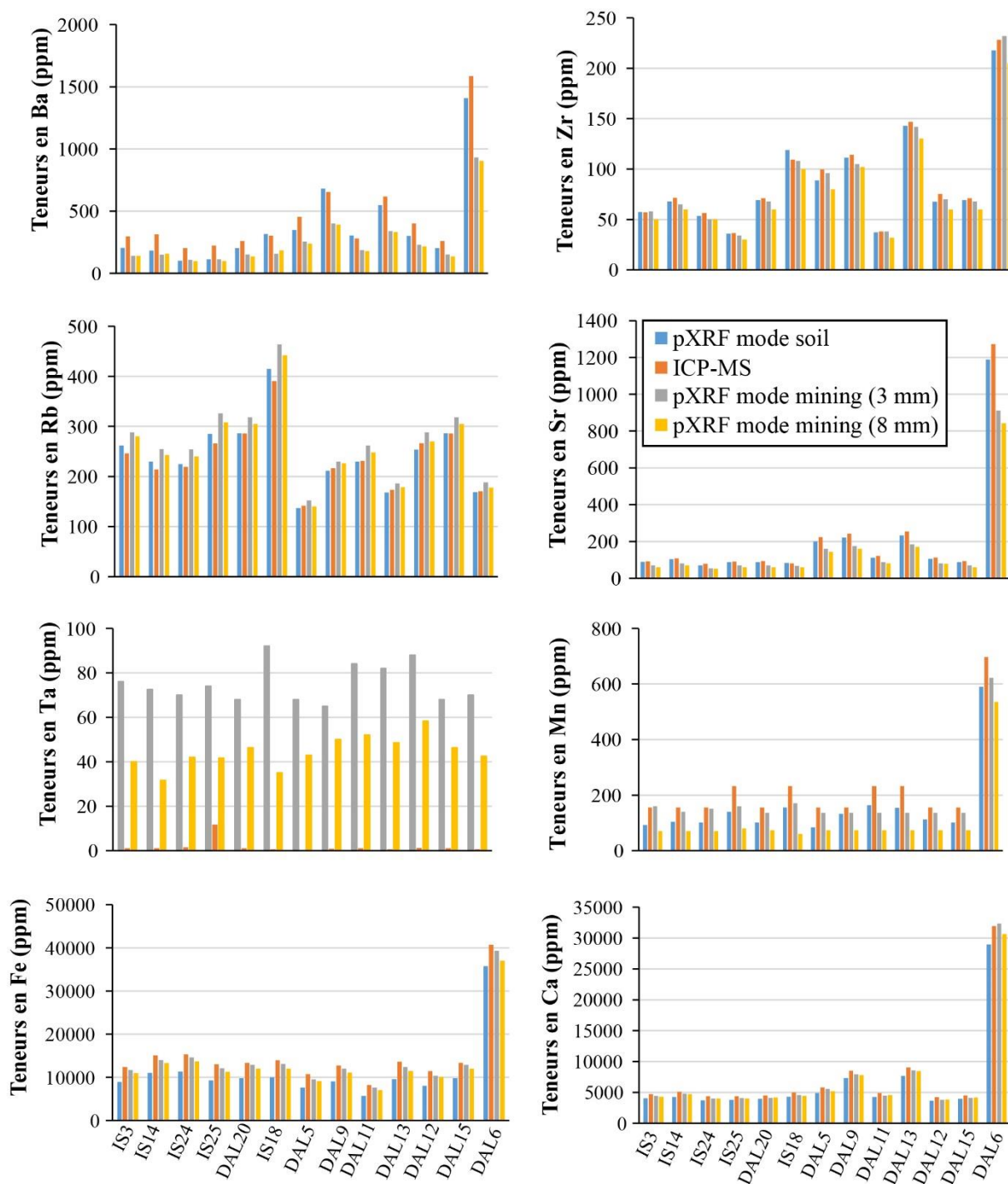


Fig. 7. Comparaison entre la moyenne des analyses FPXRF réalisées sur les poudres de roches avec l'analyse roche totale par ICP-MS

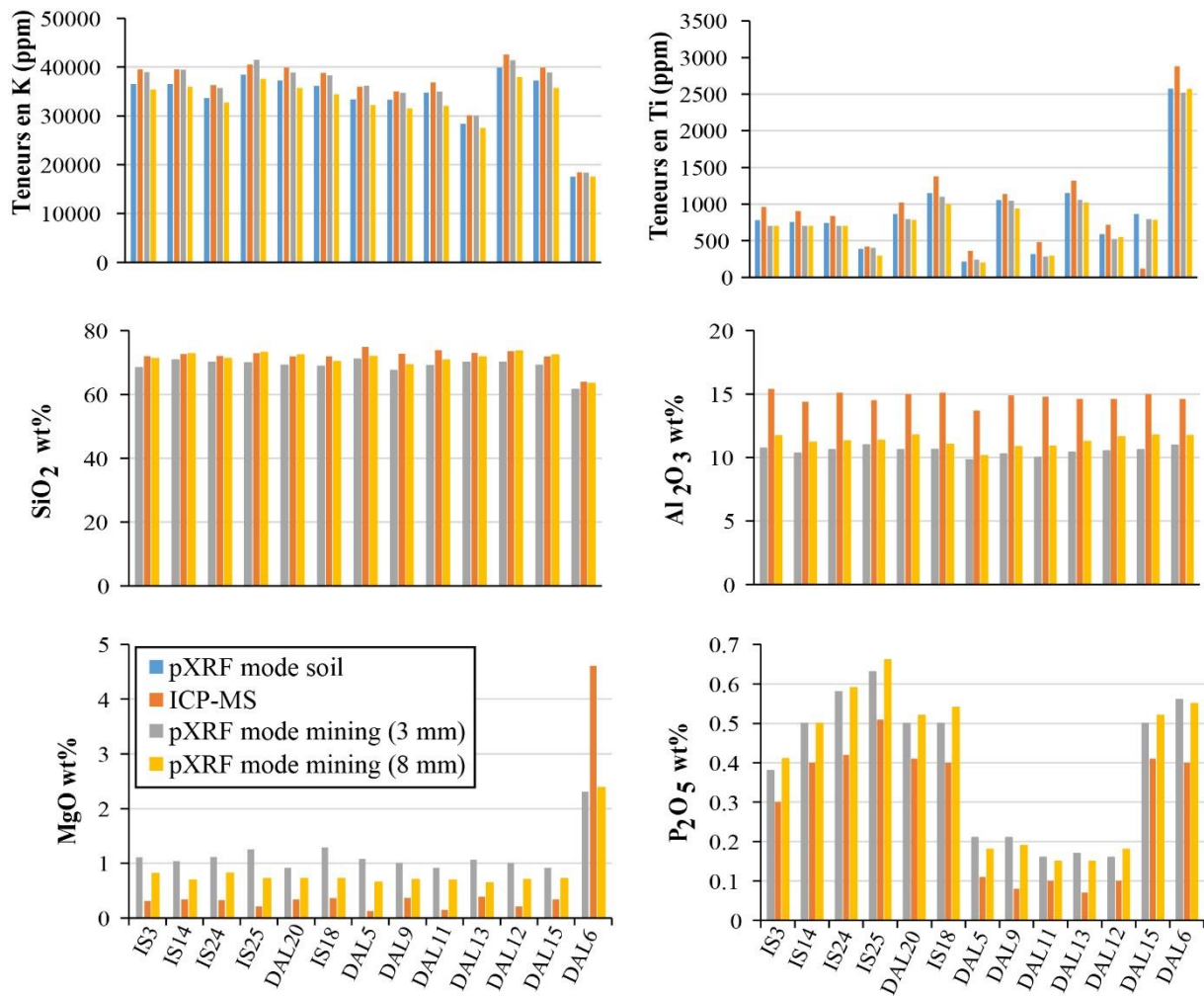


Fig. 8. Comparaison entre la moyenne des analyses FPXRF réalisées sur les poudres de roches avec l'analyse roche totale par ICP-MS

3.3 CARACTERISATION DES GRANITES ET PEGMATITES

Après les analyses sur le terrain ainsi qu'au laboratoire des granites et pegmatites à la pXRF, nous avons après cela tenté de calculer les compositions normatives en micas de chaque analyse effectuée ainsi que les concentrations en Nb-Ta correspondantes (Fig. 9). Dans les micas, Nb et Ta peuvent atteindre plusieurs centaines de ppm dans des pegmatites minéralisées. Les analyses pXRF montrent des valeurs allant jusqu'à 700 ppm de Ta. La teneur en Ta augmente avec le taux de micas des roches analysées, ce qui signifie que Ta évolue avec le pourcentage de mica analysé (Fig. 9).

Les diagrammes des rapports K/Cs v Cs, K/Rb v Cs et K/Rb v Rb des granites et ceux des minéraux de micas des granites et de la pegmatite trouvée hors des champs des granites (Fig. 10A, B et C) montrent des signes d'une évolution progressive dans la mise en place des granites et des pegmatites. Pour une analyse fiable de ces données, il faudra faire plus de mesures sur les micas des granites et pegmatites.

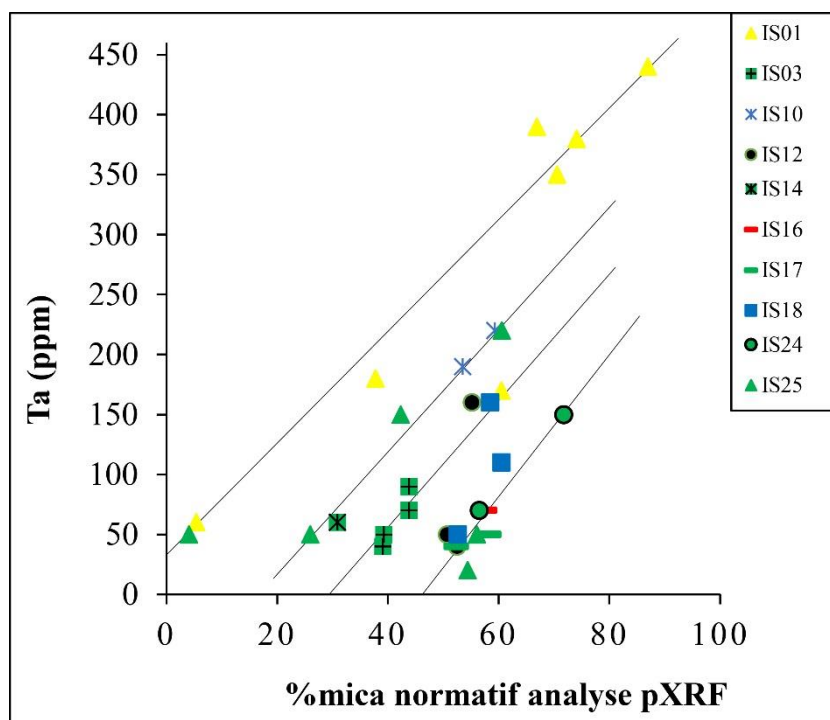


Fig. 9. Concentration de Ta en fonction du fractionnement des micas. IS01=Pegmatite, IS03=Granite, IS10=Tourmaline, IS12=Granite, IS13=Pegmatite, IS14=Granite, IS16=Granite, IS17=Granite, IS18=Granite, IS23=Tourmaline, IS24=Granite, IS25=Granite et Pegmatite

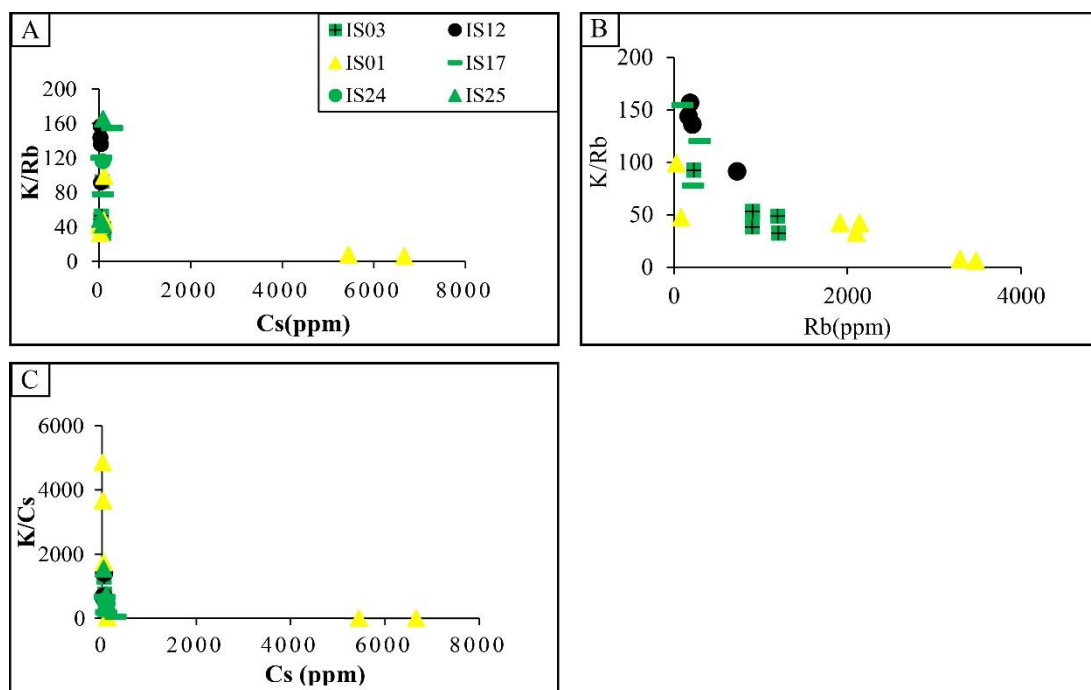


Fig. 10. Variation du rapport K/Rb en fonction de Cs (A) et Rb (B) et K/Cs en fonction de Cs (C) des micas des granites et pegmatite d'Issia analysés à la FPXRF

3.4 CARACTERES CHIMIQUES ET REPARTITION SPATIALE DES MINERAUX DE Nb-Ta

La mise en évidence du caractère génétique entre les minéraux de Nb-Ta rencontrés dans les placers alluvionnaires et les pegmatites de type C et D [6] ainsi que la très faible variation dans la composition chimique et texturale de ces minéraux ont fourni un moyen d'approcher le problème lié à la répartition spatiale des granitoïdes autour des placers colombo-tantalifères. En effet, une étude d'un nombre suffisant

d'échantillons devrait permettre non seulement de compléter le schéma évolutif de la paragenèse, mais aussi de reconnaître ses éventuelles variantes. Enfin, il était logique d'espérer qu'une telle étude conduirait à établir le lien entre l'évolution pétrogénétique et la métallogénie.

Les échantillons prélevés dans les différents placers localisés dans la région d'Issia ont dans un premier temps été analysés par la FPXRF sur le terrain et en laboratoire avant d'être soumis dans un deuxième temps à des analyses plus poussées en laboratoire par les méthodes tels que le MEB et la microsonde (EPMA). Les analyses FPXRF des minéraux de Nb-Ta sont reportées dans le diagramme des minéraux du groupe columbite (MGC, Fig. 11c). Dans ce diagramme, les rapports Ta/Nb et Mn/Fe qui sont les indicateurs de fractionnement de ces minéraux, permettent de distinguer les différentes localités et donc de suggérer que ces minéraux seraient des produits d'altération de pegmatites différentes. De plus, l'étude détaillée d'un des horizons de placer révèle une composition homogène entre les différents grains de coltan à travers tout l'horizon, ce qui permet de conclure que ces horizons correspondent à des filons ou des niveaux de pegmatite en place et qu'il n'y a pas eu de mélange entre eux. L'instrument a donc permis de mettre en évidence un champ de pegmatites avec une variabilité de composition, résultat qui sont plus étayés avec les analyses MEB et EPMA plus fiables par les travaux de [4] (Fig. 11a-b). Ainsi donc avec la FPXRF sur le terrain nous avons pu faire la distinction entre la columbite et la tantalite et vérifier si les placers avaient hérités des produits d'altération de différents types de pegmatites.

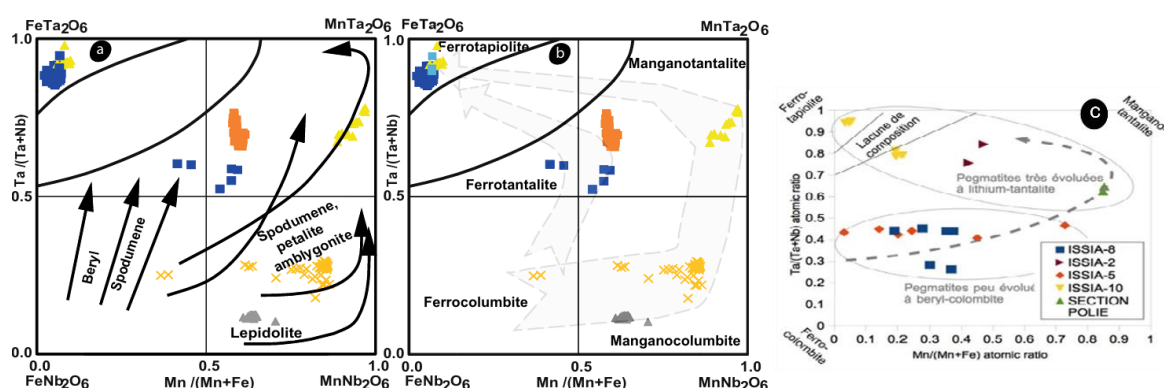


Fig. 11. Analyses des colombo-tantalites des placers d'Issia dans le quadrilatère de la columbite, montrant un modèle d'évolution typique d'un champ de pegmatites évoluant de corps peu évolués à beryl-columbite à des corps très évolués enrichis en lithium et tantale. La section polie est une tantalite de contrôle analysée en laboratoire. a et b sont issus de [4] et caractérisent des analyses de laboratoire plus poussées. c-caractérise les analyses faites par pXRF

4 CONCLUSION

La FPXRF a permis une reconnaissance rapide sur le terrain des granites fertiles ainsi que des minéraux de Nb-Ta dans les placers. Elle permet au final un gain de temps important. L'instrument a permis de mettre en évidence un champ de pegmatites avec une variabilité compositionnelle, résultat qui traditionnellement aura nécessité le transport des échantillons, et une analyse chimique plus longue. Les analyses à l'échelle du sucre de roche permettent non seulement de faire une cartographie géochimique des éléments présents dans les minéraux des roches mais également nous donnent la possibilité à moindre coût de faire une analyse roche totale des affleurements observés. Les résultats des différentes analyses ICP-MS et pXRF montrent que la fluorescence x portable est une solution pour la recherche minière.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été soutenu par le projet T2GEM (Technologies Géophysiques et Géochimiques pour l'Exploration Minière). Nous remercions l'Institut de Recherche et de Développement (IRD) pour avoir soutenu les visites de D. Baratoux et M. Van Lichtervelde à l'UFHB entre 2015 et 2022.

CONFLITS D'INTERETS

Les auteurs déclarent qu'il n'y a aucun conflit d'intérêts concernant la publication de cet article.

REFERENCES

- [1] Bruno Lemièrre, 2018. Areview of pXRF (field portable X-ray fluorescence) applications for applied geochemistry. *Journal of Geochemical Exploration* 188, 350–363.
- [2] Bosco, G.L., 2013. Development and application of portable, hand-held X-ray fluorescence spectrometers. James L. Waters symposium 2012 report. *Trends Anal. Chem.* 45, 121–134.
- [3] Joseph, B.K., Nicaise, K.A., Roland, K.B. and Yacouba, C., 2021. Pétrographie et géochimie des granitoïdes d'Issia (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal ESJ*, 17, 287-305. <https://doi.org/10.19044/esj.2021.v17n17p287>.
- [4] Brou, J.K., Van Lichtervelde, M., Kouamelan, N.A., Baratoux, D. and Thébaud, N. (2022) Petrogenetic Relationships between Peraluminous Granites and Li-Cs-Ta Rich Pegmatites in South Issia Zone (central-West of Côte D'Ivoire): Petrography, Mineralogy, Geochemistry and Zircon U-Pb Geochronology. *Mineralogy and Petrology*, 116, 443-471. <https://doi.org/10.1007/s00710-022-00790-2>.
- [5] Brou, K.J., Kouamelan, A.N. and Teha, K.R. (2024) Geochemistry of Micas from Issia Granite Complex: A Marker of Geodynamic Evolution. *Open Journal of Geology*, 14, 787-804. <https://doi.org/10.4236/ojg.2024.148034>.
- [6] Allou, A.B., Lu, H.Z, Guha, J., Naho, J., Carignan, J., Pothin, K. and Yobou, R., 2005. Une Correlation Genetique entre les Roches Granitiques, et les Depots Eluvionnaires, Colluvionnaires et Alluvionnaires de Columbo-Tantalite d'Issia, Centre-Ouest de la Cote d'Ivoire. *Exploration and Mining Geology*, 14, 61-77. <https://doi.org/10.2113/gsemg.14.1-4.61>.
- [7] Jenkins R., De Vries J.L. (1968). *Practical X-ray spectrometry*. Second edition, Philips Technical Library, Springer-Verlag Inc. 190p.
- [8] Bertin E.P. (1971). *Principles and practice of X-ray spectrometric analysis*. Plenum Press, 679p.
- [9] Jenkins R. (1976). *An introduction to x-ray spectrometry*. Philips Electronic Instruments, Heyden, 163p.
- [10] Lachance G.R. and Claisse F. (1995). *Quantitative X-ray fluorescence analysis, theory and application*. John Wiley and Sons Inc., 402p.

Pollution plastique des rivières de Kinshasa: Mise en évidence de la contamination aux microplastiques de l'hydrosystème du Pool Malebo (fleuve Congo) à Kinshasa (RD Congo) et risque sur la santé des touristes

[Plastic pollution of Kinshasa rivers: Highlighting microplastic contamination of the Malebo Pool hydrosystem (Congo River) in Kinshasa (DR Congo) and risk to the health of tourists]

Masua Tchomba Basile¹⁻², Kaki Ngisila Blanchard³, Musibono Eyul'Anki Dieudonné⁴, Pwema Kiamfu Victor⁵, and Kayembe Sungula Jean⁶

¹Doctorant, Département de Sciences de l'environnement, Faculté des Sciences, Université de Kinshasa (UNIKIN), RD Congo

²Expert en contrôle environnement, Office Congolais de Contrôle, RD Congo

³Doctorant en géographie-sciences de l'environnement, Département de Géographie-Sciences de l'Environnement, Faculté des Sciences, Université Pédagogique Nationale (UPN), RD Congo

⁴Professeur ordinaire, Université de Kinshasa, RD Congo

⁵Professeur ordinaire, Université de Kinshasa, RD Congo

⁶Professeur ordinaire, Université de Kinshasa, RD Congo

Copyright © 2024 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: Several factors threaten the integrity of aquatic ecosystem resources in the Democratic Republic of Congo. The banks of the Pool Malebo (Congo River) are also vulnerable to the presence of plastic pollution in its waters. This study aims to inventory the different types of microplastics in three compartments (water, sediment and fish) of the Congo River in the part of the Pool Malebo between the fishing stations of Maluku and Kinsuka in Kinshasa.

The search for microplastics was carried out by trapping with the Manta net. The identification and classification of plastic debris recorded in the three compartments of the Congo River were done on the basis of the density of microplastics. The results obtained showed that the physical and chemical parameters of the waters of the Congo River in the Pool Malebo generally contribute to the disintegration of macroplastics into microplastics. All the digestive tracts of the sampled fish have microplastics and the consequences on the food chain are obvious especially tourists and other populations consuming these fish. From the point of view of relative abundance of waste, PELD with 35 debris or 79.5% are the most numerous than PP with 9 debris or 20.4%. Given the danger that microplastics represent for aquatic animals and human health, further research based on the characterization of plastic waste by more advanced techniques will provide additional information on the composition of microplastics present in the Malebo Pool.

KEYWORDS: Plastic pollution, Tourism, Microplastics, Sediment, *Clarias gariepinus*, *Oreochromis niloticus*, Malebo Pool, Kinshasa.

RESUME: Plusieurs facteurs menacent l'intégrité des ressources des écosystèmes aquatiques en République Démocratique du Congo. Les rives du Pool Malebo (fleuve Congo) sont aussi vulnérables à la présence de la pollution plastique dans ses eaux. Cette étude a pour objectif d'inventorier les différents types des microplastiques dans trois compartiments (eaux, sédiments et poissons) du fleuve Congo dans la partie du Pool Malebo entre les stations de pêche de Maluku et Kinsuka à Kinshasa. La recherche des microplastiques a été réalisée par piégeage avec le filet de Manta. L'identification et classification des débris plastiques recensés dans les trois compartiments du fleuve Congo ont été faites sur base de la densité des microplastiques. Les résultats obtenus ont montré que les paramètres physiques et chimiques des eaux du fleuve Congo dans le Pool Malebo contribuent de manière générale à la désintégration des macroplastiques en micro plastiques. Tous les tubes digestifs des poissons échantillonnés ont des micro-plastiques et les conséquences sur la chaîne alimentaire est évidente surtout les touristiques et les autres populations consommatrices de ces poissons. Du point de vue abondance relative des déchets, les PELD avec 35 débris soit 79,5% sont les plus nombreux que les PP avec 9 débris soit 20,4%. Compte tenu du danger que représentent les microplastiques pour les animaux aquatiques et la santé humaine, des recherches ultérieures basées sur la caractérisation des déchets plastiques par des techniques plus avancées apporteront des informations supplémentaires sur la composition des microplastiques présents dans le Pool Malebo.

MOTS-CLEFS: Pollution plastique, Tourisme, Microplastiques, Sédiment, *Clarias gariepinus*, *Oreochromis niloticus*, Pool Malebo, Kinshasa.

1 INTRODUCTION

Les plastiques ont changé le mode de vie des êtres humains. Inventés au XX^{ème} siècle, ils sont légers, durables et peu chers. Leurs nombreux avantages ont conduit à leur utilisation dans une myriade d'applications, allant de produits personnels et ménagers, aux produits d'emballage et les ont rendus irremplaçables et omniprésents dans la vie quotidienne (Roclin, 2015).

En conséquence, la production mondiale de plastiques a augmenté de façon exponentielle depuis 1950 (Andrady, 2011). Alors qu'une partie des déchets en plastique est correctement gérée (par combustion ou recyclage), il a été estimé que des millions de tonnes de déchets plastiques finissent dans l'environnement marin (268.940 tonnes en 2014; Eriksen *et al.*, 2014). Les plastiques représentent de 50 à 80% des déchets marins, ces derniers sont liés à la forte densité de population sur les côtes continentales (Barnes *et al.*, 2009). L'intense pression anthropique exercée sur les bassins versants des cours d'eaux, lacs et océans entraîne l'apparition de nouveaux contaminants dans le milieu marin tels que les plastiques (Frère, 2017).

L'apport des microplastiques dans le milieu aquatique se fait majoritairement par les cours d'eaux. Il existe aussi des phénomènes météorologiques tels que les inondations, les crues ou les ouragans, qui peuvent exacerber ce transfert de débris de la terre à la mer (Barnes *et al.*, 2009; Thompson *et al.*, 2005). L'accumulation de débris de plastique dans la nature est l'un des changements récents le plus répandu et le plus durable à la surface de notre planète et une des grandes préoccupations environnementales de notre temps (Barnes *et al.*, 2009).

La pollution par les microplastiques devient une source de préoccupation croissante ces dernières décennies de par leur impact potentiel sur les écosystèmes, la pêche et la santé publique maritime et continentale (Froidevaux, 2018).

La quantité de déchets plastiques entrant dans les cours d'eaux, lacs et océans chaque année est estimée à plus de 6,5 millions de tonnes qui s'ajoutent à un stock difficile à évaluer (Bocquené, 2013). Sous l'action combinée de la lumière, de l'oxydation et de l'érosion mécanique, une partie de ces plastiques se fractionne en microparticules granuleuses ou fibreuses de taille généralement inférieure à 5 mm, dont le comportement dans les différents écosystèmes aquatiques est proche de celui du plancton marin (Farrell et Nelson, 2013). Ces microplastiques, concentrés par le jeu des courants d'eau, peuvent intégrer les premiers maillons de la chaîne trophique aquatique. Or, ces particules ont la faculté d'adsorber, de concentrer et de transporter un grand nombre de contaminants chimiques (Lusher *et al.*, 2013).

Les microplastiques sont présents partout, ils ont été détectés dans la colonne d'eau, dans les sédiments, dans les plages du monde entier et dans le biote (les oiseaux marins, animaux marins, poissons notamment). L'agrégation des microplastiques avec la matière organique est considérée comme la principale voie de transport des microplastiques vers les sédiments d'eau profonde. Les sédiments constitueraient ainsi un réservoir majeur pour les microplastiques (Law *et al.*, 2010; Moret-Ferguson *et al.*, 2010).

La présence de microplastiques sur le réseau trophique commence à être étudiée. Concernant le biote (algues, invertébrés aquatiques, tortues marins, poissons, etc.), plus de 250 espèces d'animaux ont été identifiées comme ingérant des débris de

plastique (Laist, 1997). Les animaux marins qui ingèrent les microplastiques sont des organismes benthiques et pélagiques, possédant des stratégies d'alimentation variées et occupant des niveaux trophiques différents (Van Cauwenberghe *et al.*, 2015).

Le transfert trophique des microplastiques est possible, il a récemment été démontré de la moule au crabe (Farrell et Nelson, 2013) et, qu'ils peuvent donc atteindre des niveaux trophiques supérieurs. Les oiseaux de mer les ingèrent directement ou indirectement, par l'intermédiaire de poissons les ayant consommé (Ryan *et al.*, 2009; Tanaka *et al.*, 2013).

La plupart des études sur les plastiques (macroplastiques, microplastiques et nanoplastiques) ont été largement effectuées au niveau des eaux marines (océans et mers) des pays développés de l'Europe, d'Amérique et de l'Asie (Roclin, 2015). Par contre, peu d'informations sont disponibles sur la contamination des milieux continentaux d'eau douce par les microplastiques. Dans ce contexte, les premières études ont mis en évidence la présence de microplastiques dans les eaux de surface et dans les sédiments de certains écosystèmes lenticques, comme le lac de Garde en Italie, le lac de Genève en Suisse ou même le lac Hovsgol en Mongolie. De même, la contamination de sédiments a été observée dans des écosystèmes lotiques comme le fleuve Saint Laurent au Canada (INERIS, 2014).

Cependant, malgré que la pollution par les microplastiques devienne une source de préoccupation croissante à travers plusieurs pays du monde durant ces dernières décennies par leur impact potentiel sur les écosystèmes et la santé publique (Froidevaux, 2018), leurs effets sur les organismes des différents hydrosystèmes de la République Démocratique du Congo en général et ceux du Pool Malebo dans le fleuve Congo en particulier restent inconnus.

L'étude effectuée par Kaki (2024) montre que tous les sites touristiques de Kinshasa situés le long des rivières ou du fleuve Congo attirent d'abord les touristes pour le repas légendaire de « *Maboke* » papillote aux feuilles de poisson d'eau douce provenant généralement dans ces cours d'eau. En revanche, le tilapia et le poisson chat, appelé également silure qui du reste sont plus consommés par ce dernier au score de 85% selon ce chercheur.

2 GÉNÉRALITÉS SUR LE PLASTIQUE

2.1 PRODUCTION DES PLASTIQUES DANS LE MONDE

La production annuelle mondiale de plastique était de 350 millions de tonnes en 2017, 359 millions de tonnes en 2018, 368 millions en 2019 et 367 millions de tonnes en 2024. Le plastique est le troisième matériau artificiel le plus abondant, après l'acier et le béton (Plastics Europe, 2018). Depuis les années 1950, un taux de croissance annuel moyen de 4 % donne lieu à une production cumulative de 8.300 millions de tonnes, dont 4.900 millions de tonnes (60%) se retrouvent dans des décharges ou dans l'environnement, ce qui représente un coût économique, social et environnemental considérable (Geyer *et al.*, 2017).

En 2015, on estimait la quantité de déchets plastiques mal gérés dans le monde entre 60 et 99 millions de tonnes (Lebreton & Andrady, 2019). Selon des estimations de Boucher & Friot (2017), la quantité annuelle totale de microplastiques se formant ou s'infiltrant dans l'environnement pourrait être de l'ordre de 11 millions de tonnes.

Si autrefois la gestion des déchets dans les villes développées et en voie de développement se posait comme une activité de nature technique, organisationnelle et financière, on se rend actuellement compte qu'elle comporte une dimension essentiellement culturelle et elle constitue un défi de taille à relever, surtout pour les villes africaines et les pouvoirs publics. L'Afrique est le lieu où sont déversés des vieux ordinateurs, des téléviseurs, des véhicules qui ne sont plus utilisés, polluant les eaux, la terre et intoxiquant les enfants (Mondo *et al.*, 2024).

En R.D Congo, les questions touchant à l'environnement et à la gestion des déchets urbains en général et plastiques en particulier comptent parmi les plus complexes auxquelles doivent répondre aujourd'hui les gestionnaires de villes en raison de leurs effets sur la santé humaine et de l'esthétique urbanistique (Lelo, 2011; Kassay, 2015; Kanene, 2016; Mafelly, 2019; Munkuomo, 2022; Holenu et al. 2022; Matadi, 2022; Vumi et al., 2023).

Si la quantité de déchets produits par personne est de 0,7 kg/personne/jour et que la population est de 12 millions d'habitants, la production de déchets par jour est de 8.400 tonnes dont 4.820 tonnes des déchets plastiques. Par contre, le taux de collecte organisée est estimé à 25% et le 75% des déchets sont mal gérés. Ces déchets sont générés dans les maisons, bureaux, hôpitaux, commerces, restaurants, navires, avions et les voies publiques (www.oanda.com; Kasuku *et al.*, 2021). Les bouteilles en plastique, les emballages alimentaires, les sacs plastiques, les couvercles, les flacons, les déchets médicaux (seringues, poche de sang, récipients plastiques ayant contenus les médicaments, etc.), les pailles en plastiques, etc. sont des produits couramment utilisés en R.D Congo (Bikay, 2017). Ces plastiques sont par la suite jetés dans les poubelles, les tranchées (caniveaux) et les cours d'eaux qui traversent la ville de Kinshasa entraînant ainsi des conséquences fâcheuses tant sur l'écologie que sur la santé humaine (Ntirumenyerwa, 2019).

2.2 CLASSIFICATION DES PLASTIQUES

Selon Frère (2017), les débris plastiques peuvent être classés selon leur taille et densité. Suivant la densité, on distingue les plastiques: Polyéthylène haute densité (HDPE); Polyéthylène basse densité (LDPE); Polypropylène (PP); Polytéréphtalate d'éthylène (PET); Polychlorure de vinyle (PVC); Polycarbonate (PC); Acétate de cellulose (CA); Acrylonitrile butadiène-styrène. En somme, il existe de nombreux types de plastiques utilisés dans l'emballage, chacun ayant des propriétés uniques qui les rendent adaptés à différentes applications. Les choix de plastiques pour les emballages dépendent souvent de facteurs tels que la durabilité, la résistance, la transparence, la flexibilité et la sécurité alimentaire. Suivant leur utilisation par l'homme:

- **Polyéthylène haute densité (PEHD):** Le PEHD est un plastique rigide et résistant, utilisé dans la fabrication de bouteilles, de contenants, de sacs et de films. Il est souvent utilisé pour les produits alimentaires et les produits chimiques;
- **Polyéthylène basse densité (PEBD):** Le PEBD est un plastique souple et léger, utilisé dans la fabrication de sacs, de films et de feuilles. Il est souvent utilisé pour les emballages de détail, tels que les sacs de supermarché;
- **Polystyrène (PS):** Le PS est un plastique rigide et transparent, utilisé dans la fabrication de bouteilles, de gobelets, de plateaux et de boîtes. Il est souvent utilisé pour les produits alimentaires et les boissons;
- **Polychlorure de vinyle (PVC):** Le PVC est un plastique souple et résistant, utilisé dans la fabrication de films, de tuyaux et de bouteilles. Il est souvent utilisé pour les produits alimentaires et les produits chimiques;
- **Polypropylène (PP):** Le PP est un plastique résistant à la chaleur et à la corrosion, utilisé dans la fabrication de bouteilles, de contenants et de films. Il est souvent utilisé pour les produits alimentaires et les produits chimiques.
- **Polycarbonate (PC):** Le PC est un plastique transparent et résistant aux chocs, utilisé dans la fabrication de bouteilles, de gobelets et de contenants pour les produits alimentaires et les boissons.

En considérant la taille, les plastiques sont catégorisés en:

- Megaplastiques: > 1m;
- Macroplastiques: 2,5 cm à 1m;
- Mésoplastiques: 5 mm à 2,5 cm;
- Microplastiques: 0,1 µm à 5 mm;
- Nanoplastiques: < 0,1 µm.

Dans le cadre de cette étude, ce sont les microplastiques qui constituent l'univers de la recherche.

2.3 DISTRIBUTION DES MICROPLASTIQUES

En effet, comme les microplastiques possèdent différentes densités, ils peuvent être présents partout dans les écosystèmes aquatiques. Les microplastiques peuvent être présents dans les sédiments, la colonne, à la surface de l'eau, dans les plages du monde entier et dans le biote (ingérés par les organismes aquatiques). Cela fait en sorte qu'une grande variété d'organismes peut être exposée aux microplastiques (Beauchemin, 2015).

Les microplastiques sont présents aujourd'hui tant dans les océans, fleuves, rivières, lacs que dans les zones polaires. Le temps de la dégradation étant long (plus de 100 ans) favorise son accumulation dans cinq zones dites gyres océaniques dont celle la plus connue est située dans l'océan Pacifique Nord communément appelé 7^{ème} continent. Les microplastiques à faible densité ont tendance à flotter à la surface de l'eau (figure 1). Les agrégats des microplastiques avec la matière organique est considérée comme la principale voie de transport des microplastiques vers les sédiments d'eau profonde. Ainsi, le sédiment deviendrait la matrice potentielle pour les microplastiques (Do Sul & Costa, 2014).

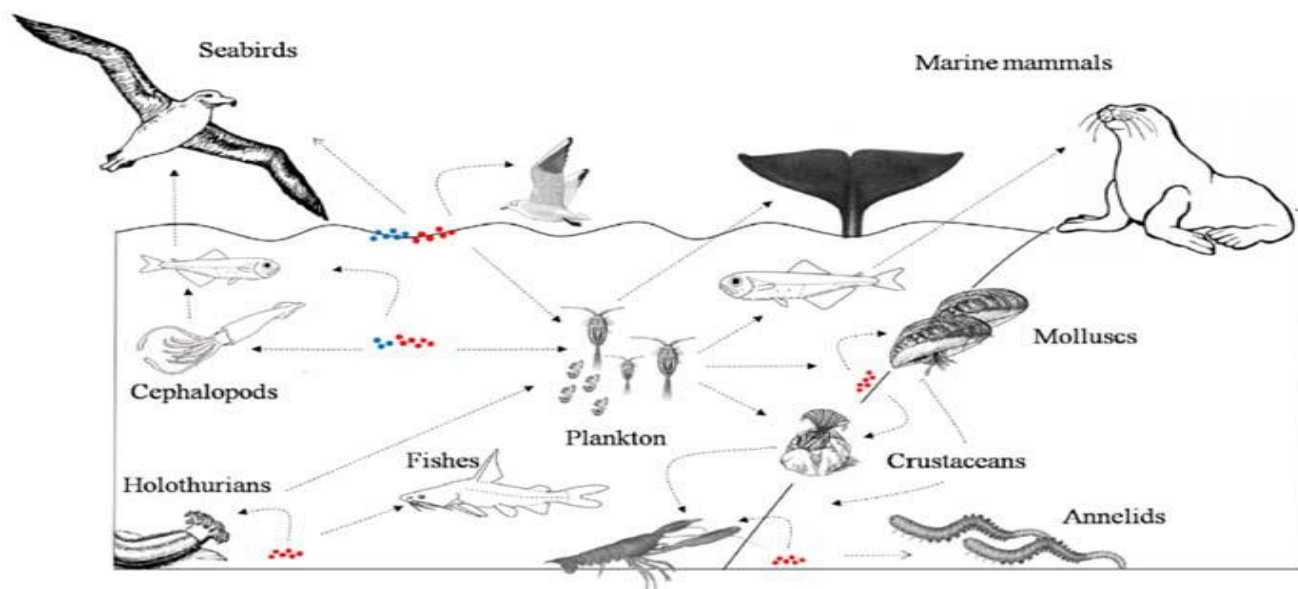


Fig. 1. Modèle conceptuel des parcours trophiques potentiels des microplastiques à travers les groupes d'invertébrés et de vertébrés marin (source: Beauchemin, 2015)

Légende: Points bleus = Polymères moins denses que l'eau de mer (PP, PE); Points rouges = Polymères plus denses (PVC)

Une étude a démontré la relation étroite entre la distribution des particules plastiques sur les plages et la distance de ces plages aux zones portuaires, dont le port où, les activités commerciales ont lieu (Janssen & Claessens, 2012). En effet, les ports contribuent en partie à la pollution des eaux côtières. Le port de Bejaia en Algérie a connu ces dernières années une expansion importante liée à ses activités commerciales. Le nombre de navires est ainsi passé de 286 durant le premier trimestre de 2011 à 338 navires pour la même période de 2012, soit une hausse de 18,1%. Toutefois, cette augmentation de l'activité portuaire se traduit également par une augmentation des nuisances environnementales. En effet, de nombreuses pertes sont ainsi observées lors de transport de marchandises et de la manutention des cargaisons sur les quais.

Les opérations de dégazage ou de déballastage contribuent pour beaucoup également à cette pollution. On remarque ainsi sans faute, les nappes de macro-déchets qui s'accumulent dans les bassins et faute de moyens de nettoyages ou même par indifférence, les déchets se retrouvent le plus souvent sur les plages voisines, transportés par les courants et les vents.

Les activités de pêche génèrent beaucoup de déchets. L'équipement qui ne sert plus aux pêcheurs se retrouve le plus souvent jeté dans l'écosystème aquatique (océan, mer, fleuve, lac et rivière). Les comportements des pêcheurs et leur ignorance sur les impacts que peuvent avoir leurs propres faits, se remarque sur les quais même de l'embarquement où on y trouve des bouteilles de plastique de tout genre et des filets.

2.4 IMPACT DES MICROPLASTIQUES SUR LES ÉCOSYSTÈMES AQUATIQUES

Dans les écosystèmes aquatiques, trois caractéristiques des microplastiques sont à la base de plusieurs inquiétudes: leur taille, la présence d'additifs dans leur composition et leur capacité d'absorber des polluants (Ivar do Sul & Costa, 2014). En raison de leur petite taille, les microplastiques possèdent une surface spécifique relativement élevée. Cela les rend susceptibles d'être contaminés par plusieurs types de polluants, comme les biphényles polychlorés (BPC), le dichloro-diphényl-trichloroéthane (DDT) et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) (Thompson *et al.*, 2012).

En effet, la surface hydrophobe du plastique attire les polluants qui n'ont pas d'affinité pour l'eau, tels que les polluants organiques persistants (POP) (Wagner et autres, 2014). Des recherches ont démontré que les microbilles de plastique, les granules de plastique et les fragments de plastique peuvent tous adsorber des polluants (Teuten *et al.*, 2009). Cette capacité d'adsorption favorise donc la concentration des polluants chimiques à la surface des microplastiques, qui agissent comme un réservoir pour les produits chimiques présents dans l'eau (Ivar do Sul & Costa, 2014). De plus, tel que vu précédemment, les microplastiques peuvent être composés de différents types de matière. Ceux-ci possèdent donc différentes densités, qui leur permettent de flotter ou de couler une fois dans l'eau. Or, les particules qui flottent peuvent se déplacer sur de longues

distances et contribuer à la dispersion des polluants (Engler, 2012). Les effets chimiques potentiels risquent d'augmenter à mesure que diminue la taille des particules de plastique. La présence de microplastiques soulève donc des questions quant à leur impact sur la qualité de l'eau (Goverse & Bech, 2011).

La présence et la persistance de microplastiques dans l'environnement vient encore aggraver le conflit de l'homme avec le mécanisme d'autorégulation selon l'expression de Kananitchev (1975). De même, des recherches effectuées dans plusieurs lacs ont montré que les HAP produits lors de la combustion des carburants fossiles étaient adsorbés sur les plastiques présents dans l'eau (The Helm, 2015). Un deuxième impact potentiel des microplastiques sur la qualité de l'eau est lié à la présence d'additifs dans les plastiques. Bien que les études existantes ne parviennent pas toutes aux mêmes conclusions, de nombreuses inquiétudes entourent les effets potentiellement nocifs que pourraient avoir ces produits chimiques (Andrady & Neal, 2009). Des substances comme le bisphénol A (BPA), le nonylphénol et les phtalates ont été détectées dans les microplastiques (Wagner *et al.*, 2014). Or, ces derniers sont soupçonnés d'être des perturbateurs endocriniens, c'est-à-dire des substances pouvant affecter l'équilibre hormonal des organismes (Wagner *et al.*, 2014). Ce risque est pris au sérieux par le gouvernement du Canada, qui étudie actuellement l'impact que ces produits chimiques pourraient avoir sur l'environnement et les humains (Industrie Canada, 2012).

○ Ingestion des microplastiques par les espèces halieutiques

Laist (1997) renseigne que plus de 250 espèces d'animaux ont été identifiés comme ingérant des débris de plastique. L'ingestion des débris plastique serait à l'origine du décès de nombreuses espèces marines. Au moins 44% des espèces d'oiseaux marin sont connues pour l'ingestion des débris plastiques (Rios *et al.*, 2007). Pour exemple, les albatros à pied noir qui alimentent leurs poussins avec les granulés de plastiques les confondant ainsi avec leur nourriture habituelle (Mallory, 2008). Une autre étude qui a été réalisée sur les fulmars en mer du Nord a démontré que 95% de ces oiseaux accumulaient en moyenne 35 pièces de plastiques dans leur estomac (Franecker, 2011).

Des microplastiques avaient été retrouvés dans le système gastro-intestinal de certains poissons ainsi que dans un cormoran à aigrettes, qui est un oiseau se nourrissant de poissons (Fletcher, 2015). Plusieurs autres études, qui ne sont pas liées spécifiquement aux eaux douces, font également état de l'ingestion des microplastiques par les organismes vivants. Les résultats de plusieurs chercheurs démontrent que les microplastiques peuvent être ingérés tant par les consommateurs primaires, comme les zooplanctons, que par les consommateurs de plus haut niveau, comme les poissons, les mollusques etc. (Beauchemin, 2015). Van Cauwenbergh (2015) aborde dans le même sens en affirmant que les microplastiques sont retrouvés dans les tissus des organismes mais aussi dans les fèces, ils peuvent être stockés dans les tissus et excrétés par les organismes.

Selon la NOAA, l'ingestion des microplastiques peut avoir trois effets. Premièrement, cela peut causer un blocage physique et endommager le système digestif de l'organisme les ayant consommés (Arthur *et al.*, 2009). Cette situation pourrait altérer les habitudes alimentaires des animaux se nourrissant de ces particules (Engler, 2012). De plus, selon certains scientifiques, l'ingestion de microplastiques pourrait empêcher les organismes de produire autant d'énergie en leur donnant une fausse impression de satiété. Leur croissance et leur reproduction pourraient conséquemment être affectées (Plourde, 2014).

Les deux autres impacts pouvant être causés par les microplastiques sont le transfert et l'accumulation dans les organismes des produits chimiques adsorbés sur les microplastiques ainsi que des produits chimiques utilisés comme additifs dans le plastique (Arthur *et al.*, 2009). Des recherches ont en effet démontré que l'ingestion de microplastiques contaminés par des BPC peut mener à un transfert, par désorption, de ce polluant dans les tissus des poissons et des oiseaux qui les consomment (Engler, 2012). De même, les microplastiques contenant des produits chimiques, comme le BPA ou les phtalates, peuvent causer des problèmes de développement et de reproduction chez certains organismes lorsqu'ils sont ingérés (Sigler, 2014). Les microplastiques agiraient donc comme des vecteurs favorisant le transfert de contaminants dans l'eau vers les organismes (Wagner et autres, 2014). Il faut toutefois souligner qu'à ce stade de la recherche, il est encore difficile de déterminer le degré de biodisponibilité des produits chimiques qui sont adsorbés sur les microplastiques (Beauchemin, 2015).

○ Enchevêtrement

L'étranglement notamment par les cordes et fibres synthétiques, lignes et filets dérivants en mers, seraient à l'origine du décès de nombreuses espèces aquatiques (poissons, oiseaux, mammifères marin, tortues, etc.). On a recensé ainsi plus 267 espèces à travers le monde touchées par le phénomène des déchets plastiques, incluant 86% des espèces de tortues marines, 44% des espèces d'oiseaux et 43% des espèces de mammifères marins comme le souligne Derraik (2002).

○ Nuisances vis-à-vis à la santé de l'homme et surtout des touristes

Les déchets échoués sur le littoral constituent pour la majorité des communes littorales, une nuisance principalement esthétique portant préjudice à l'image du site et surtout aux consommateurs de Maboke dans les sites touristiques disséminés à travers le littoral du pool Malebo. Les usagers sont particulièrement sensibles à la qualité de leurs lieux de vacances ou de loisirs. De plus, certains déchets que l'on retrouve sur les plages peuvent être la cause de nombreuses blessures pour les touristes (André, 2000).

Les particules plastiques, peuvent également être dangereuses pour la santé de l'homme. En effet, les particules de plastiques ont une grande capacité d'absorption des produits chimiques hydrophobes notamment les DDT et PCB. Leur ingestion par les organismes marins augmente le risque d'entrer dans la chaîne alimentaire avec la perspective d'atteindre l'homme au sommet de la chaîne alimentaire; après amplification au fur et à mesure de la chaîne trophique (Adams *et al.*, 2007).

○ Nuisances vis-à-vis des activités humaines

L'un des principaux impacts s'observe sur les activités touristiques et de la pêche. La présence des déchets sur le littoral porte préjudice à l'image des sites (figure 2) et constitue ainsi une nuisance esthétique qui nuit à la fréquentation touristique (André, 2000). Les déchets flottants peuvent engendrer une gêne importante pour la pêche professionnelle et la navigation. L'afflux massif des déchets plastiques endommage les engins de pêche, dont les filets (Mutombo, 2024).



Fig. 2. Différents types de plastiques trouvés aux bords du fleuve Congo à Kinsuka dans le Pool Malebo (Photo Masua, 2024)

2.5 IMPACTS SOCIOÉCONOMIQUES

Les impacts environnementaux des microplastiques soulèvent également plusieurs questions quant aux problèmes qu'ils pourraient avoir sur la santé humaine. Certains acteurs s'interrogent par exemple sur les risques que la bioamplification des microplastiques dans la chaîne alimentaire pourrait avoir sur les humains consommant les organismes contaminés (Beaucheman, 2015). D'autres chercheurs pensent que les microplastiques pourraient être présents dans l'eau potable sortant de nos robinets (Flesher, 2015). Une étude a d'ailleurs découvert que 24 bières allemandes étaient contaminées par des microplastiques, ce qui laisse penser que les humains ingèrent déjà des microplastiques sans s'en apercevoir (Liebezeit et Liebezeit, 2014).

L'impact des microplastiques sur la qualité de l'eau pourrait aussi nuire à la santé humaine. Une étude effectuée en eau douce a démontré que des biofilms bactériens peuvent se développer sur les microplastiques. L'analyse des biofilms a permis de constater que les bactéries sur les microplastiques n'étaient pas les mêmes que celles se trouvant dans la colonne d'eau. D'après certaines sources, le fait que les usines de traitement des eaux usées soient une source de microplastiques pourrait favoriser leur colonisation par des bactéries pathogènes (McCormick *et al.*, 2014).

Les microplastiques pourraient donc servir de vecteur pour les maladies et avoir un impact sur la qualité et la sécurité de l'eau potable (Wagner *et al.*, 2014). Le nettoyage des plages, le traitement des déchets engendre des coûts importants pour les communes. Lorsque les laisses de mer sont encombrées de ces déchets, elles ne sont que danger et insalubrité à toute volonté de développement touristique, par conséquent les communes se retrouvent dans l'obligation de procéder au nettoyage (Poitou, 2003).

La pêche professionnelle souffre énormément des déchets plastiques en mer comme dans les océans et les fleuves. La production halieutique mondiale connaît une baisse fascinante. Un tiers des remontés de filets sont des débris marins en majorité des plastiques. Certains poissons connaissent des migrations suite à l'envahissement de leur habitat par des déchets plastiques. Par contre, la croissance de certaines espèces des plantes aquatiques est gênée par le dépôt massif des macroplastiques dans les bords (figure 3) comme dans les îlots de certains écosystèmes aquatiques.



Fig. 3. *Plastiques occupant les habitats de quelques espèces végétales aquatiques aux abords et milieu du fleuve Congo à Kinsuka (A) et Kingabwa (B) dans le Pool Malebo (Photo Masua, 2024)*

3 MILIEU ET METHODE

3.1 MILIEU D'ÉTUDE

Cette étude a été menée dans quatre sites de pêche du Pool Malebo dans le fleuve Congo. Il s'agit des sites de Maluku, Kinkole, Kingabwa (Port OCC et Baramoto) et Kinsuka (hôpital de la rive et le port Ledia) (figure 4).

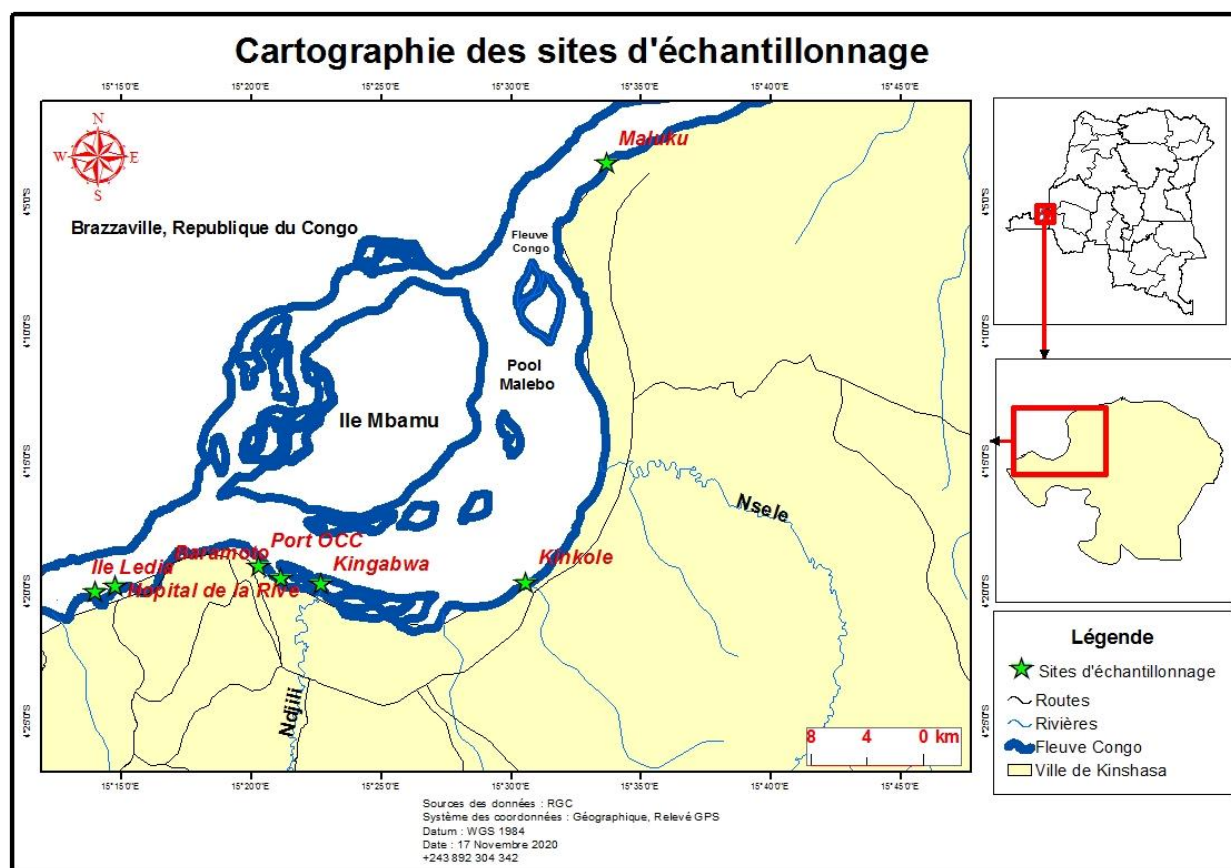


Fig. 4. Cartographie du Pool Malebo (fleuve Congo) reprenant les sites d'échantillonnage (source: Masua, 2024)

3.1.1 PRESENTATION ET SITUATION GEOGRAPHIQUE DU POOL MALEBO

Le Pool Malebo est l'élargissement du fleuve Congo situé à la frontière entre la République Démocratique du Congo et la République du Congo, les deux capitales de deux pays Kinshasa et Brazzaville, sont situées de part et d'autre de l'issue en aval du Pool. Cette partie du fleuve comprise entre Maluku (en amont) et Kinsuka (en aval) est long d'environ 35 km sur 25 km de large. Sa profondeur moyenne est de 3 m avec un maximum de 20 m. Sa superficie est d'environ 500 km². Il est situé entre 4° 5' et 4° 20' Sud et de 15° 19' à 15° 30' Est et à une altitude de 275 m (Burgis et Symoens, 1987).

Le mot Pool est un terme anglais qui signifie « piscine » ou « lac ». Ce terme est utilisé au Congo pour désigner la vaste étendue d'eau située entre Kinshasa et Brazzaville. Le terme Pool Malebo fait référence aux palmiers rôniers (*Borassus flabelifera*), localement appelés Malebo qui arboraient abondamment les rives et les îles du Pool Malebo ainsi que la plaine alluviale de Kinshasa (Mukendi *et al.*, 2021).

Il occupe le fond d'une cuvette qu'entoure des collines dépassant souvent 500 m. La partie centrale du Pool Malebo est occupé par l'île M'bamou en République du Congo et par plusieurs groupes de petites îles dont un archipel se trouve à l'embouchure de la rivière de N'djili (Burgis et Symoens, 1987).

3.2 METHODE

3.2.1 PROSPECTION DES SITES

Pour nous assurer de la viabilité des sites retenus pour cette étude, des visites sur le terrain ont été organisées. Lors de ces descentes, nous avons eu contact avec certains pêcheurs qui œuvrent dans les différents sites concernés afin d'avoir leur avis sur cette problématique des plastiques en rapport avec leur métier. Cette étape s'est déroulée entre le mois de février et avril 2024. Les coordonnées géographiques (latitude, longitude et altitude) (tableau 1) de chaque site ont été prélevées à l'aide d'un GPS de marque GARMIN EXTREX afin de localiser géographiquement notre zone d'étude.

Tableau 1. Coordonnées géographiques des sites d'échantillonnage

Sites d'échantillonnage	Coordonnées géographiques		
	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Maluku (Port Gafura)	04° 2' 63''	15° 33' 41,6''	253
Kinkole (Port Kinkole)	04° 13' 906''	15° 30' 37,5''	272
Kingabwa (rivière N'djili)	04° 19' 41''	15° 22' 41''	277
Baramoto (rivière Kalamu)	04° 19' 264''	15° 20' 69,4''	267
Baramoto (port OCC)	04° 18' 58,296''	15° 20' 18,263''	262
Kinsuka (Hôpital de la rive)	04° 19' 44,9''	15° 14' 47,6''	225
Kinsuka (Ile Ledia)	04° 19' 58,4''	15° 13' 61,4''	244

3.2.2 EVALUATION DES PARAMÈTRES ABIOTIQUES

L'échantillonnage des données a été réalisé durant dix mois soit de la période allant des mois de mai 2024 au février 2021. Les évaluations des paramètres abiotiques: physico-chimiques, type de substrats de fond ainsi que les paramètres chimiques de l'eau ont eu lieu durant la même période.

3.2.2.1 PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX

Quatre paramètres physiques de l'eau de surface du fleuve Congo ont été mesurés sur chaque site d'étude. Il s'agit de la température (°C), de la conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$), de la turbidité (NTU: Unité Néphélométrique de Turbidité) et du pH. La sonde multi paramètres Combo pH-mètre de marque HANNA pH/ORP/EC/DO N° HI 9828 a été utilisée lors du prélèvement de ces paramètres lors des différentes campagnes des pêches (Munganga *et al.*, 2024).

3.2.2.2 SUBSTRAT DE FOND DES SITES

Sur chaque site d'étude de microplastiques dans le Pool Malebo (fleuve Congo), les sédiments ont été récoltés à l'aide de deux échantillonneurs de sédiments (long d'un mètre et demi avec une poche à carotte de 20 cm) sous forme de carotte (figure 5). Pour classer les substrats de fond, les sédiments ont été placés dans un bassin puis séchés à l'air libre. Après séchage, les sédiments ont été tamisés à l'aide des tamis de mailles comprises entre $0,01\ \mu\text{m}$ à $1\ \text{mm}$ afin d'identifier la nature du substrat de fond.



Fig. 5. Echantillonneur de sédiments utilisé lors du prélèvement des sédiments dans le fleuve Congo (photo Masua, 2022)

3.2.2.3 PARAMÈTRES CHIMIQUES DES EAUX

Différents paramètres chimiques des eaux du fleuve Congo au niveau de tous les sites de pêche ont été mesurés. Il s'agit des phosphates (PO_4^{3-}) (mg/l), des nitrates (NO_3^-) (mg/l), des nitrites (NO_2^-) (mg/l), de la demande biologique en oxygène (DBO) et de la demande chimique en oxygène (DCO). Le dosage de ces paramètres a été effectué concomitamment au Laboratoire de Chimie de la Direction d'Assainissement de Kinshasa et du Laboratoire mobile Département Contrôle Environnement de l'Office Congolais de Contrôle par la méthode de spectrophotométrie.

L'eau ayant servis aux analyses chimiques au Laboratoire a été échantillonnée à l'aide d'un kit (échantillonneur d'eau) du Laboratoire mobile de l'Office Congolais de Contrôle. Ce dernier est constitué d'un bidon de 10 litres, d'une batterie de 12 volts qui alimente le générateur. Ce dispositif quant à lui, comporte des touches de démarrage, d'arrêt, d'accélération de vitesse de prélèvement et une autre touche qui sert à préciser la quantité (litres ou millilitres) de l'eau à prélever. Un tuyau de deux mètres possédant un dispositif avec un tamis de fines mailles est connecté au système. Ce dernier sert à puiser et à faire passer l'eau jusque dans le bidon du dispositif. Le tout est gardé dans une valise en plastique portable (figure 6).



Fig. 6. Kit d'échantillonneur d'eau utilisé pour le prélèvement d'échantillons d'eaux du fleuve Congo (photo Masua, 2022)

Après prélèvement, les échantillons d'eau ont été gardés dans des galons d'un litre, étiquetés (le nom du site, la date et l'heure de la récolte ainsi que les analyses à effectuer étaient repris sur chaque échantillon) puis conservés au froid dans une glacière à moins de 10°C conformément à la norme AFNOR NF EN 25667 (ISO 5667) avant de subir les analyses appropriées (AFNOR, 2009). Cette méthode précise les précautions à prendre lors du prélèvement et transport des échantillons à l'aide des galons stériles et bouchés pour une protection contre toute contamination.

Les concentrations en nitrite et en nitrate ont été analysées par la méthode de photométrie grâce à un photomètre de marque *Lovibond MD 610*, celles de la demande chimique et biologique en oxygène ont été réalisées respectivement avec un thermo-réacteur de marque *Lovibond RD 125* (méthode au bichromate de potassium) et thermorégulateur de marque *Lovibond OXIDirect* (méthode manométrique).

3.2.3 ACTIVITÉS ANTHROPIQUES SUR LES SITES

Les activités anthropiques de chaque site d'étude ont été décrites grâce à des observations directes réalisées lors des descentes sur terrain.

3.2.4 ECHANTILLONNAGE DES MACROS ET MICROPLASTIQUES

Le matériel biologique de cette étude est constitué des échantillons de deux espèces de poissons dont *Clarias gariepinus* Burchell, 1822 et *Oreochromis niloticus* Linnaeus, 1758 des différentes tailles et poids capturés dans les stations de pêche du Pool Malebo. Ces deux espèces de poissons ont été choisies car (i) elles font partie des ceux qui sont les plus consommés et vendus dans les marchés de Kinshasa et à travers le pays et plus consommés par les touristes (Lusasi *et al.*, 2019; Masua *et al.*, 2024; Kaki, 2024).



Fig. 7. *Clarias gariepinus* Burchell, 1822 pêché dans le Pool Malebo (fleuve Congo) (photo Masua, 2024)



Fig. 8. *Oreochromis niloticus* Linné, 1758 pêché dans le Pool Malebo (fleuve Congo) (photo Masua, 2024)

Les méthodes d'identification et la quantification des microplastiques varient et peuvent concerner trois matrices: eau, sédiment (dont le sable ou la boue) et biote. Pour étudier une zone, certains auteurs analysent 1 g de microplastiques, d'autres auteurs analysent chaque fragment un à un (pour étudier la variabilité entre fragment sur un même lieu), mais le plus souvent les échantillons sont constitués d'un ou de plusieurs pools (Bocquene, 2013; Beauchemin, 2017).

Dans le cadre de cette étude, les microplastiques ont été récoltés dans l'eau, les sédiments et les poissons. Plusieurs procédés ont été utilisés lors de cette récolte. L'identification des macroplastiques a été réalisée sur les sites d'étude dans le but de faire un lien entre le visible (macroplastiques) et l'invisible (microplastiques).

3.2.4.1 PIÉGEAGE DES MICROPLASTIQUES DANS L'EAU

Dans l'eau, les microplastiques ont été piégés à la surface sur une distance de 600 m de long et 50 m de large le long des berges. Des randonnées de plus de quatre heures pour chacune ont eu lieu sur chaque site d'étude lors de la récolte des microplastiques. Pour y arriver, trois personnes munies chacune d'un filet de *Manta* (figure 9) montaient à bord d'une pirogue pour piéger les débris des plastiques. L'ouverture du filet était posée au sens contraire du courant d'eau afin de recueillir les microplastiques nageant sur la surface d'eau (Bocquene, 2013).

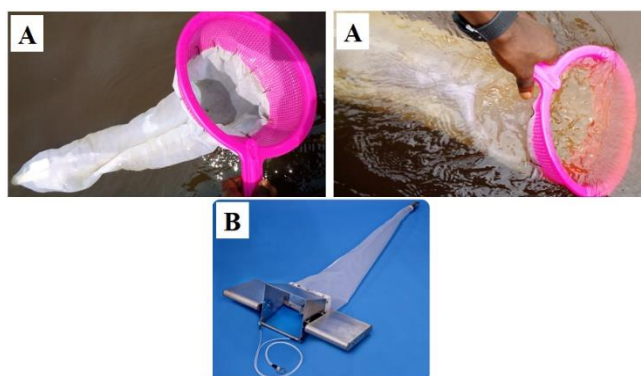


Fig. 9. *Filet de Manta aménagé (A) et inspiré (B) pour la récolte des microplastiques à la surface de l'eau* (Source: Masua, 2024; <https://bionef.fr>)

Le filet de *Manta* est composé d'une toile de 45 cm de long avec de très fines mailles d'environ 0,5 nm d'entre nœuds. Le cadre du filet est constitué d'un passoir en plastique de 12,5 cm de rayon avec une manche de 5 cm. Le filet de *Manta* est un dispositif qui permet de collecter les planctons ou les microplastiques. Il existe plusieurs formes de ce filet et, dans le cadre de cette étude, nous avons adapté ce filet en nous servant des matériels disponibles localement tout en respectant les normes du filet.

3.2.4.2 RÉCOLTE DES SÉDIMENTS

Les sédiments ont été récoltés aux bords des rives et dans le fleuve à deux mètres de large de la rive. Aux bords comme dans le fleuve, les sédiments ont été récoltés à une profondeur comprise entre 0 à 20 cm à l'aide d'un échantillonneur de sédiment (carotte) (voir figure). Le dispositif est muni d'une manche longue d'un mètre et demi et d'une poche de carotte de 20 cm. Pour recueillir les sédiments, il suffit d'enfoncer la carotte au fond en frappant avec un marteau approprié au dispositif pour atteindre le niveau souhaité. Après récolte, les sédiments ont été gardés dans des bocaux en plastiques puis étiquetés

(nom du site, date et l'heure de la récolte) avant les analyses appropriées. Ainsi, trois échantillons de sédiments ont été récoltés sur chaque site d'observation.

3.2.4.3 RECHERCHES DES PLASTIQUES SUR LES LIGNES MINEURE ET MAJEURE

Un transect de 100 m de long et de 20 m de large était tracé à l'aide du mètre ruban entre les lignes mineure et majeure du fleuve Congo au niveau de chaque site d'échantillonnage. Les lignes ont été parcourues afin d'y récolter les macros et microplastiques qui étaient visibles et facilement identifiables. Dans certains endroits, le tamisage du sable suivi du triage des débris plastiques a été effectué.

Après échantillonnage, les macroplastiques récoltés ont été gardés dans des sacs plastiques et les microplastiques dans des bocaux en plastiques pour leur identification ultérieure. Le nom du site, la date et l'heure de la récolte étaient repris sur chaque échantillon. La récolte des macroplastiques se justifie dans le sens où, l'abondance d'une catégorie donnée de ces derniers dans un site permettra de faire un lien entre les microplastiques qui sont retrouvés dans le même site, leurs possibilités de dégradation et leur intégration dans les écosystèmes aquatiques (Bocquene, 2013).

3.2.5 RÉCOLTE ET MANIPULATION DES POISSONS

Deux espèces de poissons sont retenues pour évaluer l'intégration et le transfert des microplastiques dans l'écosystème aquatique et la chaîne trophique. Les échantillons des poissons *Clarias gariepinus* Burchell, 1822 (considéré comme un poisson qui vit dans le milieu benthique) et *Oreochromis niloticus* Linnaeus, 1758 (considéré comme un poisson pélagique) ont été obtenus lors des campagnes des pêches qui ont eu lieu dans les différents sites retenus dans le Pool Malebo (fleuve Congo). La collecte des spécimens de poisson a été effectuée mensuellement pendant huit mois durant la période allant des mois de février 2024 à novembre 2024.

Les poissons ont été récoltés au moyen des filets maillants dormant de 10, 15, 20, 25, 35, 40 et 50 mm d'entre nœud, de longueur comprise entre 30 et 100 m et 2,5 à 10 m de hauteur avec une ralingue supérieure et une ralingue inférieure composée successivement des flotteurs et des plombs. Le filet épervier a aussi été utilisé lors de la pêche active. D'autres poissons ont été obtenus par des achats auprès des pêcheurs artisanaux rencontrés dans le fleuve Congo.

Au laboratoire, les poissons capturés ont été identifiés à l'aide de clés d'identification systématique proposées par Lévêque & al., (1990 & 1992); Mbega & Teugels (2003); Stianssny et al., (2007). Sur chaque spécimen, la longueur totale (LT) exprimé en mm a été prélevée selon Lévêque & al., (1990); Kamdem & Teugels (1998) à l'aide d'un ichtyo mètre électronique disponible au Laboratoire de Limnologie, Hydrobiologie et Aquaculture du Département de Biologie de l'Université de Kinshasa.

Pour la précision sur la taille des spécimens, les poissons ont été regroupés en classes de tailles suivant la règle de Sturge (Pwema, 2014) et calculé selon les formules suivantes: $NC = 1 + (3,3 \log N)$ $NC = 1 + 3,33 \cdot \log N$ et $IC = \frac{T_{max} - T_{min}}{NC}$ (Pwema et al., 2024) dont; NC exprime le nombre de classe; N est le nombre total d'individus pour l'échantillon considéré, Tmax et Tmin (mm) expriment respectivement les tailles maximale et minimale.

3.2.6 DÉTECTION DES MICROPLASTIQUES

Plusieurs méthodes sont utilisées pour identifier les microplastiques. Il s'agit notamment de: la méthode visuelle, la méthode par spectroscopie (*Infrarouge*, *Infrarouge à Transformé de Fourier*), la méthode analytique (Spectroscopie Raman, Microscopie Electronique, Colorimètre Différentiel à Balayage, Chromatographie Gazeuse couplée à la spectrométrie de masse, etc.). De toutes ces méthodes, la méthode visuelle (observation à l'œil nu) est la plus couramment utilisée pour l'identification des microplastiques dans les différents niveaux des écosystèmes aquatiques (Roclin, 2015).

3.2.6.1 RECHERCHE DES MICROPLASTIQUES À LA SURFACE DE L'EAU

La détection des microplastiques dans l'eau a consisté au tri des différents débris recueillis lors du piégeage des polluants plastiques à la surface de l'eau avec le filet de *Manta*. Il a été question de faire un tri manuel des débris (de 1 à 5 mm) visibles à l'œil nu après plusieurs heures de fouille (Mclanchlan, 2019).

3.2.6.2 RECHERCHE DES MICROPLASTIQUES DANS LES SEDIMENTS

Dans les échantillons de sédiments, les particules plastiques visibles à l'œil nu (de 1 à 5 mm) ont été tout d'abord triées manuellement par taille puis, les sédiments ont été tamisés après séchage (Roclin, 2015; Mclanchlan, 2019) à l'aide des tamis des pores variant entre 0,5µm à 4.75 mm.

3.2.6.3 RECHERCHE DES MICROPLASTIQUES DANS LES POISSONS

La recherche des microplastiques dans le poisson s'est fait soit par dissection de son estomac ou intestin, soit par recherche dans les fèces, soit encore par broyage/coupe histologique des tissus (Thompson *et al.*, 2004; Cole *et al.*, 2011; Claessens *et al.*, 2013; Lusher *et al.*, 2013; Van Cauwenberghe *et al.*, 2015).

En ce qui nous concerne, nous avons procédé par l'analyse des contenus stomacaux des poissons. Chaque poisson a été disséqué ventralement (de la cavité buccale à l'anus). Le tube digestif a été retiré et disséquer. Ensuite, les microplastiques ont été séparés du reste des contenus stomacaux au moyen d'une solution sursaturée de chlorure de sodium (NaCl) grâce à leur densité. Les particules surnageant à la surface de la solution ont été recueillies puis analysés (INERIS, 2014).

3.2.7 ANALYSE ET IDENTIFICATION DES MICROPLASTIQUES

La caractérisation visuelle est la méthode la plus couramment utilisée pour l'identification des microplastiques. Elle consiste à identifier les microplastiques en s'appuyant sur les critères tels que: le type, la forme, le stade de dégradation et la couleur. Les caractéristiques chimiques et physiques (par exemple, la densité spécifique) peuvent également être utilisées pour différencier les microplastiques des autres éléments de l'échantillon (Roclin, 2015).

Pour la classification et l'analyse d'échantillons de microplastiques recueillis de l'eau, de sédiments et de poissons, nous avons fait recourt à la nature du plastique qui compose l'emballage pour déterminer la composition chimique suivant la classification proposée par Frère (2017) pour détecter les différents types de polymères et des polyester (PP, PE, PET, PS, LDPE et PEHD) identifiables par cette technique (Hidalgo-Ruz *et al.*, 2012).

L'industrie du plastique a créé un système de sept codes, numérotés de un à sept qui correspondent à des plastiques aux caractéristiques et aux propriétés différentes. Il formalise sous forme de logo triangulaire avec trois flèches (cercle de Möbius) présent sur l'ensemble des emballage plastiques, ce symbole et son chiffre donnent des indications sur la nature du plastique qui compose l'emballage.

4 RESULTATS

4.1 VARIABLES ENVIRONNEMENTALES

4.1.1 PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX

La variation des différents paramètres physico-chimiques des eaux du fleuve Congo dans le Pool Malebo aux Isites d'échantillonnage retenus dans le cadre de cette étude est consignée au tableau 3. Les données détaillées de ces mêmes paramètres sont reprises en annexe (annexe 5).

Tableau 2. Variation des paramètres physico-chimiques des eaux du fleuve Congo dans le Pool Malebo

Sites	Paramètres physico-chimiques															
	Température (°C)				pH				Conductivité (µS/cm)				Turbidité (ppm)			
	Mi	Ma	Mo	Ec	Mi	Ma	Mo	Ec	Mi	Ma	Mo	Ec	Mi	Ma	Mo	Ec
Maluku (Port Gafura)	28	30	28,5	0,65	6,1	6,9	6,62	0,26	20	30	22,5	3,75	10	14	11	1,5
Kinkole (Port Kinkole)	26	29	27,5	1	5,8	6,2	5,97	0,12	20	30	24,5	4,5	8	15	11,75	2,75
Kingabwa (rivière N'djili)	25	28	26,15	0,93	6,2	6,7	6,45	0,15	28	30	29,2	0,7	14	16	14,75	0,75
Baramoto (rivière Kalamu)	29	31	29,75	0,75	6,2	6,7	6,45	0,15	40	100	70	20	18	50	34,5	10,5
Baramoto (port OCC)	27	29	28	0,5	5,9	6,6	6,15	0,22	28	30	27	3,5	10	15	13,25	1,62
Kinsuka (Hôpital de la rive)	26	28	27,5	1	6,4	6,9	6,7	0,15	20	40	32,5	7,5	10	20	15,5	3,5
Kinsuka (Ile Ledia)	26	29	27,5	1	6,5	6,9	6,72	0,12	18	40	24,5	7,75	8	20	12	4
ANOVA 1	F = 4,10 ; p = 0,0071 ; LSD = 1,6738				F = 5,41 ; p = 0,0016 ; LSD = 0,3591				F = 8,29 ; p = 0,0001 ; LSD = 17,060				F = 7,44 ; p = 0,0002 ; LSD = 8,9174			

Légende: Mi = Minimum, Ma = Maximum, Mo = Moyenne et Ec = Ecart-type

Il se dégage des résultats repris au tableau ci-haut que les eaux du fleuve Congo sont chaudes. La température moyenne enregistrée au niveau de sept sites d'étude dans le Pool Malebo se situe entre $26,15 \pm 0,93^\circ\text{C}$ et $29,75 \pm 0,75^\circ\text{C}$. L'analyse de la variance à un facteur (ANOVA 1) appliquée aux données de la température montre une différence très hautement significative ($F = 4,10$; $p = 0,0071$). La valeur critique de LSD (1,6738) relève que les valeurs élevées de température ont été observées à Baramoto ($29,75 \pm 0,75^\circ\text{C}$) à l'affluent de la rivière Kalamu et Maluku ($28,5 \pm 0,65^\circ\text{C}$) et la plus faible est relevée à Kingabwa ($26,15 \pm 0,93^\circ\text{C}$) à l'affluent de la rivière N'djili. La variation du potentiel d'hydrogène montre que ces eaux sont légèrement acides. Une différence hautement significative ($F = 5,41$; $p = 0,0016$) a été observée entre les valeurs moyennes de potentiel d'hydrogène. Le LSD test (0,3591) montre que le pH le plus acide ($5,97 \pm 0,12$) est observé à Kinkole tandis que la valeur moyenne faible de l'acidité ($6,72 \pm 0,12$) est relevée au site de Kinsuka à l'île Ledia. D'une manière générale, la conductivité est restée faible; l'analyse de la variance montre une différence très hautement significative ($F = 8,29$; $p = 0,0001$) entre les moyennes de conductivité. Avec une valeur critique de 17,060, le LSD test montre que la concentration moyenne la plus élevée en ions ($70 \pm 20 \mu\text{S/cm}$) est observée à l'affluent de la rivière Kalamu et la plus faible ($22,5 \pm 3,75 \mu\text{S/cm}$) est celle du site de Maluku. L'eau du fleuve Congo est légèrement trouble; l'analyse de variance appliquée aux valeurs moyenne de turbidité dégage une différence très hautement significative ($F = 7,44$; $p = 0,0002$) entre les moyennes des différents sites. La valeur critique de LSD test (8,9174) montre que la teneur moyenne la plus élevée ($34,5 \pm 10,5 \text{ ppm}$) en solides dissous est observée à l'affluent de la rivière Kalamu alors que la valeur moyenne la plus faible ($11 \pm 1,5 \text{ ppm}$) est observée à Maluku. Les données détaillées des analyses statistiques sont reprises en annexe 6.

4.1.2 REGROUPEMENT DES SITES EN FONCTION DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

En se basant sur les valeurs des paramètres physico-chimiques des eaux, deux groupes des sites très significativement différents ($r = 0,991$) sont mis en évidence par le dendrogramme résultant de la Classification Hiérarchique Ascendante des sites d'étude dans le Pool Malebo (fleuve Congo) (figure 10). Le premier groupe est formé par le site de Baramoto et le deuxième par les restes des sites qui, forment à leur tour deux autres sous-groupes. Le premier sous-groupe est distant du deuxième à 7 et, est formé par les sites Kingabwa, OCC et Kinsuka 1. Le deuxième sous-groupe est formé par les sites Kinkole, Kinsuka 2 et Maluku et se situe à une distance Euclidienne de 3 par rapport à l'origine.

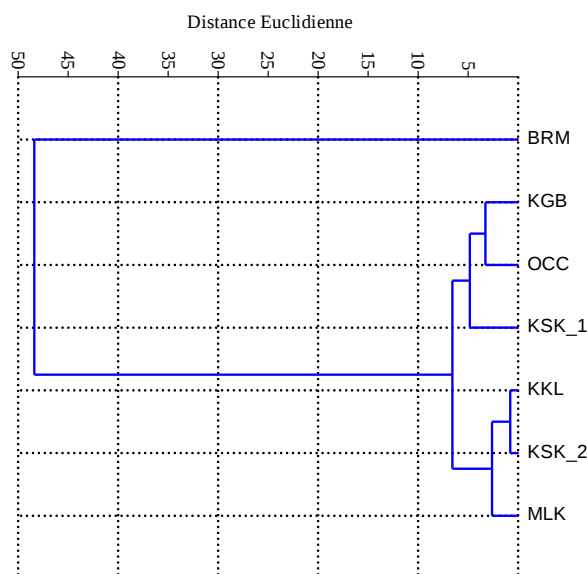


Fig. 10. Regroupement des sites d'étude dans le Pool Malebo (fleuve Congo) sur base des valeurs de paramètres physico-chimiques des eaux

Légende: BRM: Baramoto (affluent rivière Kalamu), KGB: Kingabwa, OCC: Port OCC, KSK1: Kinsuka 1, KSK2: Kinsuka 2 et MLK: Maluku

4.1.3 SUBSTRAT DE FOND DES SITES D'ÉCHANTILLONNAGE

L'analyse granulométrique a permis de classer le substrat de fond des sites d'échantillonnage des microplastiques en six types (tableau 4).

Tableau 3. Pourcentage de recouvrement de chaque type de substrat de fond aux sites d'étude

Substrats	Sites d'étude						
	MLK	KKL	KGB	BRM	OCC	KSK1	KSK2
Sable (%)	25	20	5	6	0	70	30
Vase (%)	0	0	10	14	15	0	0
Sable vaseux (%)	65	75	45	25	10	25	0
Boue (%)	0	0	38	55	65	0	0
Pierres (%)	0	0	0	0	0	5	70
Débris végétaux (%)	10	5	2	0	5	0	0

Légende: MLK = Maluku; KKL = Kinkole; KGB = Kingabwa; BRM = Baramoto (affluent rivière Kalamu), OCC = port OCC; KSK1 = Kinsuka 1 et KSK2 = Kinsuka 2

Le pourcentage de recouvrement des différents types de substrat de fond aux sites d'étude varie d'un milieu à l'autre. Le fond des sites de Maluku et Kinkole est dominé par le sable vaseux (respectivement 65% et 75%), suivi du sable (25% et 20% respectivement). Le fond est dominé par le substrat de type sable vaseux (45%) et boue (38%) à l'affluent de la rivière N'djili à Kingabwa. Le pourcentage le plus élevé du substrat de fond à l'affluent de la rivière Kalamu et OCC est représenté par la boue (55% et 65% respectivement). Le substrat de fond des sites de l'hôpital de la Rive est dominé par le sable (70%) et sable vaseux (25%) tandis que celui de l'île Ledia est dominé par les pierres (70%) et le sable (30%).

4.1.4 PARAMÈTRES CHIMIQUES

La variation des différents paramètres chimiques des eaux du fleuve Congo dans le Pool Malebo aux sites d'étude est reprise au tableau 5. L'annexe 7 reprend les données détaillées de ces mêmes paramètres.

Tableau 4. Valeurs des paramètres chimiques des eaux du fleuve Congo dans le Pool Malebo

Sites	Paramètres chimiques																			
	Nitrite (mg/L)				Nitrate (mg/L)				Phosphate (mg/L)				DBO ₅ (O ₂ /L)				DCO (O ₂ /L)			
	Mi	Ma	Mo	Ec	Mi	Ma	Mo	Ec	Mi	Ma	Mo	Ec	Mi	Ma	Mo	Ec	Mi	Ma	Mo	Ec
MLK	0,03	0,06	0,04	0,01	0,39	0,51	0,44	0,04	0,8	1,16	1,01	0,12	4,56	7,52	5,86	0,91	7,82	10,5	9,26	0,9
KKL	0,06	0,08	0,06	0	0,69	0,98	0,85	0,11	0,95	1,2	1,06	0,1	7,98	12,62	9,75	1,57	11,64	18,24	14,56	2,24
KGB	0,07	0,2	0,11	0,04	0,79	1,1	1	0,1	0,96	1,34	1,13	0,15	28,92	42,08	33,95	4,06	68,39	82,02	74,59	4,86
BRM	0,08	0,1	0,09	0	0,94	1,2	1,07	0,07	0,92	1,42	1,24	0,16	59	81,25	69,19	6,02	154,23	183,54	170,25	12,31
OCC	0,09	0,81	0,44	0,35	0,92	1,04	0,98	0,03	0,89	1,26	1,09	0,1	64,8	86,52	73,57	6,47	151,52	180,1	165,55	9,65
KSK1	0,07	0,62	0,21	0,2	0,54	0,94	0,81	0,13	0,86	1,31	0,98	0,16	26,78	31,06	29,13	1,43	39,91	56,28	47,68	4,55
KSK2	0,04	0,07	0,05	0,01	0,48	0,82	0,61	0,1	0,95	1,41	1,14	0,13	9,87	14,95	11,87	1,59	26,05	31,72	29,44	1,76
ANOVA 1	F = 2,35 ; p = 0,0685 ; LSD = 0,2752				F = 12,6 ; p = 0,0000 ; LSD = 0,1885				F = 0,90 ; p = 0,5135 ; LSD = 0,2684				F = 101 ; p = 0,0000 ; LSD = 8,1849				F = 282 ; p = 0,0000 ; LSD = 11,966			

Légende: MLK = Maluku, KKL = Kinkole, KGB = Kingabwa, BRM = Baramoto, OCC = Baramoto port OCC, KKS1 = Kinsuka hôpital de la Rive, KSK2 = Kinsuka Ile Ledia, Mi = Minimum, Ma = Maximum, Mo = Moyenne et Ec: Ecart-type

Les résultats repris au tableau 5 ci-dessus montrent que la concentration moyenne des différents paramètres chimiques des eaux du fleuve Congo varie d'un site à l'autre. Les eaux présentent de faible teneur en nitrite avec une différence non significative ($F = 2,35$; $p = 0,0685$; $LSD = 0,2752$) entre les valeurs moyennes qui sont comprises entre $0,03 \pm 0,01$ mg/L (Maluku) et $0,2 \pm 0,04$ mg/L (Kingabwa). La teneur moyenne en nitrate la plus élevée ($F = 12,6$; $p = 0,0000$; $LSD = 0,1885$) est observée à Baramoto ($1,2 \pm 0,07$ mg/L) et la faible concentration moyenne ($0,39 \pm 0,04$ mg/L) est obtenue à Maluku. Les teneurs moyennes en ions phosphate à travers les différents sites ne présentent pas une différence significative ($F = 0,90$; $p = 0,5135$; $LSD = 0,2684$); elles sont comprises entre $0,8 \pm 0,12$ mg/L (Maluku) et $1,42 \pm 0,16$ mg/L (Baramoto). L'analyse de la variance à un facteur (ANOVA 1) appliquée aux données de la demande biologique en oxygène révèle une différence très hautement significative ($F = 101$; $p = 0,0000$) entre les différentes moyennes. La valeur critique de comparaison (8,1849) de LSD test montre que la valeur moyenne la plus élevée est observée sur le site de Baramoto ($86,52 \pm 6,47$ O₂/L) et la faible valeur est relevée à Maluku ($4,56 \pm 0,91$ O₂/L). La concentration moyenne en demande chimique en oxygène présente une différence très hautement significative ($F = 282$; $p = 0,0000$) entre les sites. Le LSD test (11,966) montre que la faible concentration ($7,82 \pm 0,9$ O₂/L) est relevée dans le site de Maluku et la concentration la plus élevée ($183,54$ O₂/L) est observée à Baramoto. Les données détaillées des analyses statistiques des de ces paramètres sont reprises en annexe 8.

4.2 ACTIVITES ANTHROPIQUES OBSERVEES SUR LES SITES

Les activités anthropiques recensées sur les différents sites d'échantillonnage dans le Pool Malebo (fleuve Congo) sont consignées au tableau 6.

Tableau 5. Activités anthropiques menées le long du Pool Malebo (fleuve Congo)

Sites	Activités identifiées	Total
Maluku	Tourisme, Activités portuaires, pêche artisanale, commerce, lessive et baignade	6
Kinkole	Activités portuaires, pêche artisanale, commerce, lessive, baignade, tourisme, vente et scierie de bois (grume).	8
Kingabwa (rivière N'djili)	Dragage du sable, rejets des déchets industriels, pêche artisanale, riziculture et agriculture vivrière	5
Baramoto (rivière Kalamu)	Vente et scierie de bois, dragage du sable, rejets des déchets industriels, rejets de déchets domestiques, évacuation sauvages des fosses septiques et pêche artisanale	7
Baramoto (port OCC)	Commerce, activités portuaires, pêche artisanale, rejets des déchets industriels, ménagers et des hydrocarbures non utilisables, lessive, pour les baleinières et tourisme	8
Kinsuka (Hôpital de la rive)	Pêche artisanale, baignade, lessive, vaisselle, rejets des domestiques et hospitaliers	6
Kinsuka (Ile Ledia)	Extraction du sable, production caillasses et moellons, pêche artisanale et tourisme	4

Plusieurs activités anthropiques ont été recensées à travers les différents sites d'échantillonnages dans le Pool Malebo. Parmi ces activités, la pêche artisanale, la lessive, la baignade, le commerce au bord du fleuve, les rejets des déchets ménagers sont celles qui sont les plus observées. Les sites de Baramoto à l'entrée de la rivière Kalamu et au niveau du port de l'OCC sont ceux où un grand nombre des activités sont relevées (8 et 7 activités respectivement) et moins d'activités (4) sont recensées à Kinsuka sur l'Ile Ledia.

4.3 TYPES DES MACROPLASTIQUES IDENTIFIES SUR LES SITES

Les différents types des macroplastiques recensés à travers les sites d'échantillonnage à la surface du fleuve Congo et le long des berges sont consignés au tableau 7.

Tableau 6. Types des macroplastiques

Sites	Type des microplastiques				
	PET	PP	PS	PEHD	PELD
Maluku	+	+	-	+	+++
Kinkole	+	+	+	+++	+++
Kingabwa (rivière N'djili)	+	+	+	+++	++
Baramoto (rivière Kalamu)	+++	+	+	+++	++
Baramoto (port OCC)	+++	+	+	+	+
Kinsuka (Hôpital de la Rive)	+++	+	+	+	+
Kinsuka (Ile Ledia)	+++	+	+	++	+

Légende: + = présence

Suivant leur composition chimique, six groupes des macroplastiques sont identifiés au Pool Malebo sur du fleuve Congo et, tous les groupes sont présents à travers tous les sites d'échantillonnage. Du point de vue abondance numérique, le PET sont visibles dans tous les sites mais plus abondants à Kinsuka (Ile Ledia: 50% et Hôpital de la Rive: 40%), Kingabwa (à l'affluent de la rivière N'djili: 45%), Baramoto (à l'affluent de la rivière Kalamu: 30%) et Baramoto (au port de l'OCC: 30%). Les PELD sont plus abondants à Maluku (60%) et Kinkole (50%) et moins abondants à Baramoto (à l'affluent de la rivière Kalamu: 30%). Les PEHD sont plus abondants à Baramoto (à l'affluent de la rivière Kalamu: 40%), abondants à Kingabwa (à l'affluent de la rivière: 25%) et Kinsuka (Hôpital de la Rive: 25%). Par contre, les PS sont absents à Maluku et moins abondants sur les autres sites (figure 11).

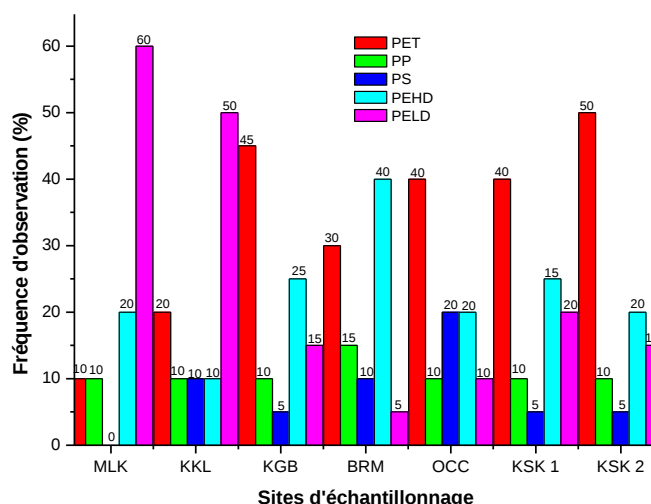


Fig. 11. Fréquence d'observation des types de macroplastiques dans le Pool Malebo

Légende: MLK = Maluku, KKL = Kinkole, KGB = Kingabwa (rivière N'djili), BRM = Baramoto (rivière Kalamu), OCC = Baramoto (port OCC), KSK 1 = Kinsuka (Hôpital de la Rive) et KSK 2 = Kinsuka (Ile Ledia)

4.4 TYPES DES MICROPLASTIQUES IDENTIFIÉS

Les microplastiques sont mis en évidence dans trois compartiments du fleuve Congo dans sa partie Pool Malebo: la surface de l'eau, le sédiment ainsi que les poissons *Clarias gariepinus* Burchell, 1822 et *Oreochromis niloticus* Linné, 1758.

4.4.1 SUR LA SURFACE D'EAU

Les différents types des microplastiques récoltés puis identifiés sur la surface du fleuve Congo dans le Pool Malebo sont repris au tableau 8.

Tableau 7. *Types des microplastiques présents sur la surface des eaux du fleuve Congo dans le Pool Malebo*

Sites	Type des microplastiques					Total
	PET	PP	PS	PEHD	PELD	
Maluku	0	0	0	0	3	3
Kinkole	3	1	2	0	14	20
Kingabwa (rivière N'djili)	8	4	9	3	7	31
Baramoto (rivière Kalamu)	5	0	7	6	6	24
Baramoto (port OCC)	2	5	8	3	11	29
Kinsuka (Hôpital de la Rive)	0	0	1	0	5	6
Kinsuka (Ile Ledia)	0	0	2	0	3	5
Total	18	10	29	12	49	118

Il ressort des résultats repris au tableau ci-dessus qu'au total, 118 échantillons de microplastiques sont récoltés et identifiés sur la surface des eaux du fleuve Congo dans le Pool Malebo. Les sites de Kingabwa (31 microplastiques), port OCC (29 microplastiques), Baramoto (24 microplastiques) et Kinkole (20 microplastiques) présentent des grandes quantités des microplastiques recueillis que les sites de l'hôpital de la Rive (6 microplastiques), Ile Ledia (5 microplastiques) et Maluku (3 microplastiques). Du point de vue abondance, les microplastiques de type PELD sont majoritaires (49 microplastiques soit 41,5%) suivis des PS (29 microplastiques soit 24,6%), PET (18 microplastiques soit 15,3%), PEHD (12 microplastiques soit 10,2%) et les PP (10 microplastiques soit 8,47%) sont les moins représentés (figure 12).

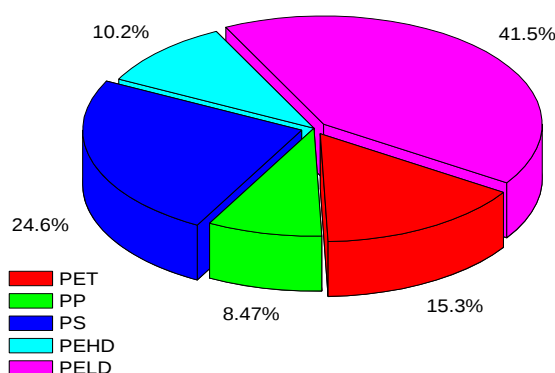


Fig. 12. *Abondance relative de différents types de microplastiques identifiés sur la surface des eaux du fleuve Congo (Pool Malebo)*

4.4.2 TYPES DES MICROPLASTIQUES IDENTIFIÉS DANS LES SÉDIMENTS

Le nombre et les différents types des microplastiques identifiés dans les sédiments récoltés à travers les sites d'étude retenus dans le Pool Malebo (fleuve Congo) sont consignés au tableau 9.

Tableau 8. Types des microplastiques en nombre recensés dans les sédiments du fleuve Congo dans le Pool Malebo

Sites	Type des microplastiques					Total
	PET	PP	PS	PEHD	PELD	
Maluku	0	0	2	0	6	8
Kinkole	1	0	3	2	8	14
Kingabwa (rivière N'djili)	3	2	5	3	11	24
Baramoto (rivière Kalamu)	2	1	3	2	10	18
Baramoto (port OCC)	4	3	1	4	9	21
Kinsuka (Hôpital de la Rive)	1	0	4	1	7	13
Kinsuka (Ile Ledia)	0	0	1	0	2	3
Total	11	6	19	12	53	101

Il se dégage des résultats repris au tableau 9 ci-dessous que cent et un (101) microplastiques ont été identifiés dans les sédiments des sites d'étude retenus dans le Pool Malebo. Les microplastiques du type PELD sont les plus nombreux avec 53 débris soit 52,5% à travers les sédiments de tous les sites suivis de PS (19 microplastiques soit 18,8%), PEHD (12 microplastiques soit 11,9%), PET (11 microplastiques soit 10,9%) et PP (6 microplastiques soit 5,94%) (figure 13). Les sédiments du site de Kingabwa présentent le nombre élevé des microplastiques tandis que les sédiments du site de Kinsuka ont présentés un nombre faible des microplastiques.

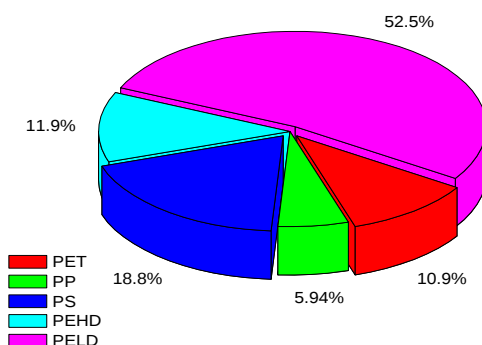


Fig. 13. Abondance relative de différents types de microplastiques identifiés dans les sédiments des sites d'étude dans le fleuve Congo (Pool Malebo)

4.4.3 TYPES DES MICROPLASTIQUES IDENTIFIES DANS LES TUBES DIGESTIFS DES POISSONS

Etant donné que les microplastiques ont été recherchés dans les tubes digestifs de deux espèces de poissons différentes (*Clarias gariepinus* et *Oreochromis niloticus*), les échantillons de ces espèces récoltés dans le cadre de cette étude ont été manipulés de manière séparée. L'annexe 9 reprend certaines photos des débris des microplastiques mises en évidence dans les tubes digestifs de poissons *C. gariepinus* et *O. niloticus*.

4.4.3.1 CLARIAS GARIEPINUS

Le tableau 10 reprend les types des microplastiques recensés dans les tubes digestifs des poissons *Clarias gariepinus* échantillonnés dans les stations de pêche du Pool Malebo (fleuve Congo). Les photos de quelques fragments des plastiques mis en évidence lors des observations au laboratoire sont reprises sur la figure 14.

Tableau 9. Différents microplastiques identifiés dans les tubes digestifs des poissons *Clarias gariepinus* du fleuve Congo dans le Pool Malebo (fleuve Congo)

Sites	Type des microplastiques					Total	%
	PET	PP	PS	PEHD	PELD		
Maluku	0	0	0	0	5	5	12,1
Kinkole	0	2	0	0	8	10	24,3
Kingabwa	0	5	0	0	17	22	53,6
Kinsuka	0	0	0	0	4	4	9,7
Total	0	7	0	0	34	41	99,9
%	0	17	0	0	82,9		99,9

Sur un total de 41 débris de microplastiques identifiés dans les tubes digestifs de poissons *Clarias gariepinus* à travers toutes les stations de pêche du Pool Malebo dans le fleuve Congo, seuls deux catégories de plastiques intègrent les tubes digestifs des poissons. Les polyéthylènes à basse densité (PELD) avec 34 débris soit 82,9% sont les plus représentatifs que les polypropylènes (PP) avec 7 débris soit 17%. Les poissons capturés au niveau de la station de Kingabwa présentent une proportion élevée de contamination (53,6%) par les débris suivie de ceux récoltés à Kinkole (24,3%), Maluku (12,1%) et Kinsuka (9,7%).

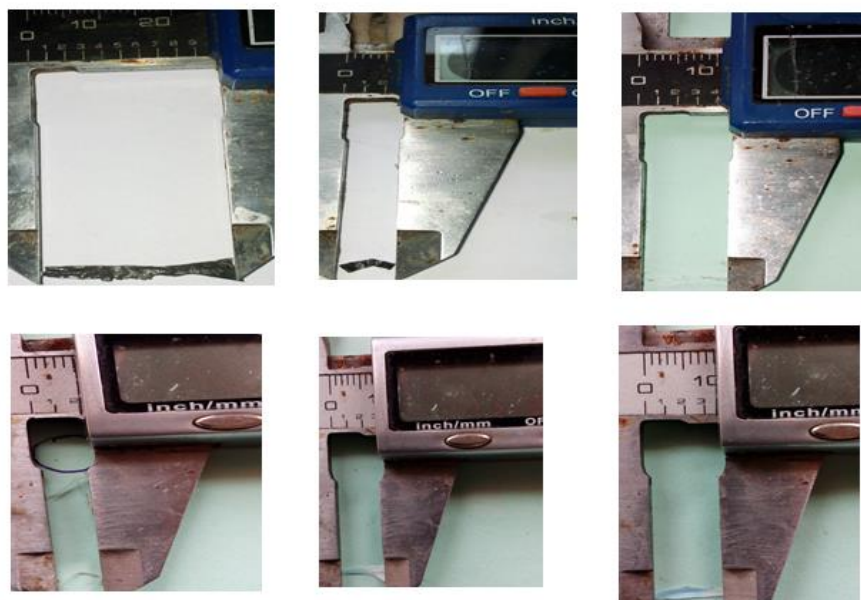


Fig. 14. Photos de quelques fragments plastiques mis en évidence dans les tubes digestifs de poissons *Clarias gariepinus* lors des observations au laboratoire (Photos Masua, 2021)

4.4.3.2 OREOCHROMIS NILOTICUS

Le tableau 11 reprend les différents types des microplastiques identifiés dans les tubes digestifs des poissons *Oreochromis niloticus* échantillonnés à travers les stations de pêche du Pool Malebo dans le fleuve Congo. Les photos de quelques fragments plastiques mis en évidence lors des observations au laboratoire sont reprises sur la figure 15.

Tableau 10. Différents types de microplastiques identifiés dans les tubes digestifs des poissons *Oreochromis niloticus* du fleuve Congo dans le Pool Malebo

Sites	Type des microplastiques					Total	%
	PET	PP	PS	PEHD	PELD		
Maluku	0	0	0	0	2	2	4,5
Kinkole	0	2	0	0	16	18	40,9
Kingabwa	0	4	0	0	7	11	25
Kinsuka	0	3	0	0	10	13	29,5
Total	0	9	0	0	35	44	99,9
%	0	20,4	0	0	79,5		99,9

Deux types de microplastiques (PELD: polyéthylène basse densité et PP: polypropylène) intègrent les tubes digestifs des poissons *Oreochromis niloticus* dans le Pool Malebo (fleuve Congo). Du point de vue abondance relative, les PELD avec 35 débris soit 79,5% sont les plus nombreux que les PP avec 9 débris soit 20,4%. Au niveau de station de pêche, les poissons récoltés au site de Kinkole sont les plus contaminés avec 18 débris soit 40,9% suivie de Kinsuka avec 13 débris soit 29,5%, Kingabwa avec 11 débris soit 25% et Maluku avec 2 débris soit 4,5%.

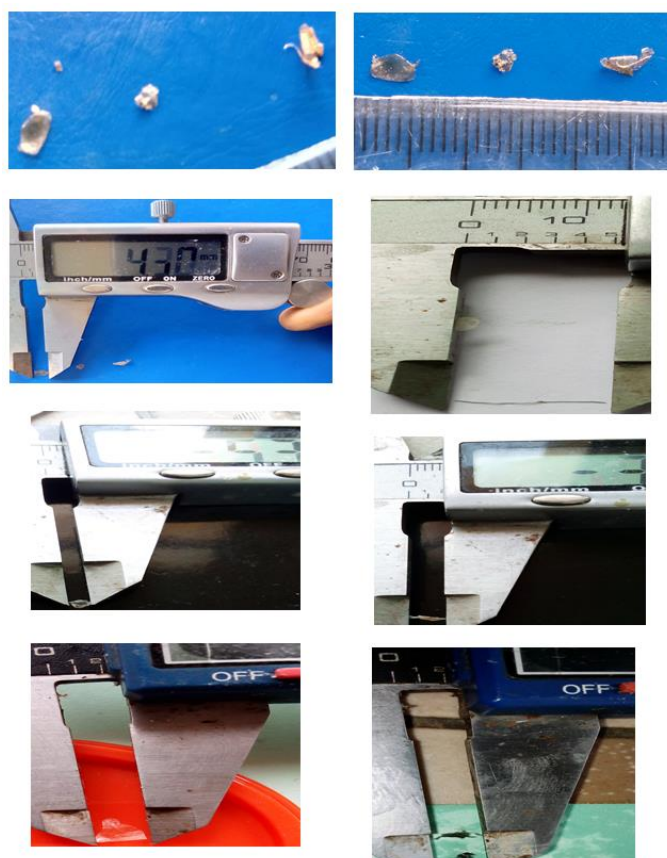


Fig. 15. Photos de quelques fragments plastiques mis en évidence dans les tubes digestifs de poissons *Clarias gariepinus* lors des observations au laboratoire (Photos Masua, 2021)

4.4.4 PREVALENCE DES MICROPLASTIQUES IDENTIFIES DANS LES TUBES DIGESTIFS EN RAPPORT AVEC LES CLASSES DE TAILLES DE POISSONS

La prévalence des différents types de microplastiques identifiés dans les tubes digestifs de poissons *Clarias gariepinus* et *Oreochromis niloticus* est consignée dans le tableau 12. Les données de classes de tailles de poissons sont reprises en annexe (annexe 10).

Tableau 11. *Prévalence des microplastiques dans les contenus digestifs des poissons en fonction des classes de tailles*

Classes de tailles	Intervalle des classes (mm)		Nombre des spécimens		Ni.CMp	
	<i>C. gariepinus</i>	<i>O. niloticus</i>	<i>C. gariepinus</i>	<i>O. niloticus</i>	<i>C. gariepinus</i>	<i>O. niloticus</i>
I	[43,4 ; 106,7[	[47,7 ; 81,8[	18	4	11	1
II	[108 ; 171,3[	[83 ; 117,1[	33	27	19	18
III	[173 ; 236,3[	[118 ; 152,1[	21	19	9	10
IV	[238 ; 301,3[	[153 ; 187,1[	3	12	1	7
V	[303 ; 366,3[	[188 ; 222,1[	1	7	0	2
VI	[368 ; 431,3[	[223 ; 257,1[	0	3	0	1
VII	[433 ; 496,3[	[258 ; 292,1[	1	4	0	2
VIII	[498 ; 561,3[	[293 ; 327,1[	3	4	1	3
Total			80	80	41	44

Légende: Ni.CMp = Nombre d'individus Contaminés par les Microplastiques

Il ressort des données reprises au tableau 12 ci-dessus que les spécimens des poissons *Clarias gariepinus* et *Oreochromis niloticus* sont regroupés en huit classes de tailles. En termes du nombre de spécimens par classe de tailles, la deuxième classe avec 33 spécimens, troisième classe avec 21 spécimens et première avec 18 individus présentent un nombre élevé des individus chez *C. gariepinus*. Chez *O. niloticus*, la deuxième avec 27 individus, troisième avec 19 individus et la quatrième classe de tailles avec 12 individus regroupent un plus grand nombre de spécimens que les autres. En termes de la prévalence de contamination des individus par les microplastiques en fonction de classe de tailles, les poissons *Clarias gariepinus* regroupés dans la deuxième avec 19 individus contaminés soit 46%, la première avec 11 individus contaminés soit 27% et la troisième classe avec 9 individus soit 22% présentent des proportions élevées de contamination. Chez *O. niloticus* ce sont les spécimens des classe II avec 18 spécimens soit 41%, classe III avec 10 spécimens soit 23% et classe IV avec 7 individus soit 16% sont les plus contaminés (figure 16).

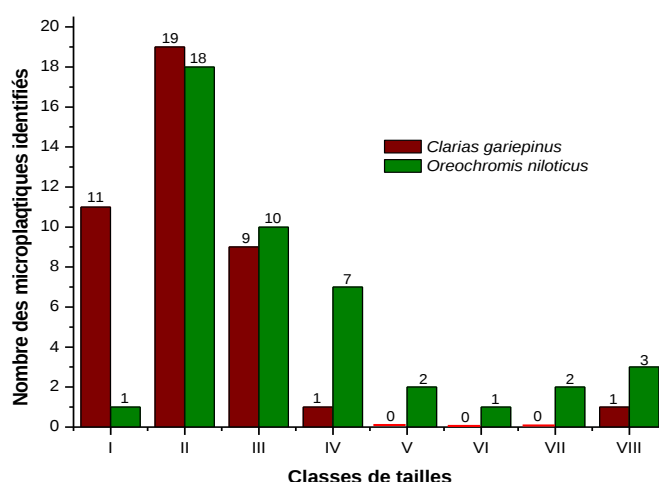


Fig. 16. *Prévalence des microplastiques dans les contenus digestifs des poissons en fonction des classes de tailles*

4.4.5 COULEUR ET TAILLE DES MICROPLASTIQUES IDENTIFIÉS SUR LA SURFACE D'EAU ET DANS LES SEDIMENTS

La couleur et la taille des différents microplastiques identifiés dans l'eau et les sédiments du Pool Malebo dans le fleuve Congo sont reprises au tableau 13.

Tableau 12. Couleur et taille des microplastiques identifiés dans l'eau et le sédiment

Eaux		Fra	%	Sédiments		Fra	%
Couleur	Taille (mm)			Couleur	Taille (mm)		
Blanche	0,14 – 23,4	10	8,47	Blanche	0,34 – 46,27	11	10,89
Blanche pâle	0,18 – 41,6	29	24,57	Blanche pâle	0,6 – 23,4	33	32,67
Brune	0,2 – 1,4	23	19,49	-	-	-	-
Noire	0,9 – 37,14	31	26,27	Noire	0,85 – 54,8	44	43,56
Bleu foncé	0,3 – 2,57	16	13,55	Bleu pâle		8	7,92
Noire-tacheté	1,54 – 43,72	9	7,62	Jaune pâle	0,18 – 42,7	5	4,95
Total		118	99,97	Total		101	99,99

Légende: Fra = Fréquence absolue, % = pourcentage et - = néant

Il ressort des résultats repris au tableau 13 ci-dessus que, les microplastiques identifiés à la surface des eaux du fleuve Congo dans le Pool Malebo présentent six couleurs (blanche, blanche pâle, brune, noire, bleu foncé et noire-tacheté) et des tailles comprises entre 0,14 mm et 43,72 mm. En termes d'abondance, les microplastiques de couleur noire (26,27%), blanche pâle (24,57%), brune (19,49%) et bleu foncé (13,55%) sont les plus nombreux. Dans les sédiments, les microplastiques présentent cinq types de couleurs (blanche, blanche pâle, noire, bleu pâle et jaune pâle) avec des tailles comprises entre 0,18 mm et 54,8 mm. Les microplastiques de couleur noire sont plus abondants (43,56%) suivis de ceux de la couleur blanche pâle (32,67%) et blanche (10,89%).

4.4.6 COULEUR ET TAILLE DES MICROPLASTIQUES IDENTIFIÉS DANS LES TUBES DIGESTIFS DE POISSONS

Les différentes couleurs et tailles des microplastiques relevées dans les contenus stomacaux des poissons *Clarias gariepinus* et *Oreochromis niloticus* pêchés dans le Pool Malebo dans le fleuve Congo sont reprises en fonction des sites d'étude.

4.4.6.1 SITE DE MALUKU

Les couleurs et tailles des microplastiques identifiés dans les tubes digestifs de poissons récoltés à Maluku sont consignées dans le tableau 14.

Tableau 13. Couleurs et tailles des microplastiques identifiés dans les poissons *Clarias gariepinus* et *Oreochromis niloticus* pêchés à Maluku

Espèces de poissons							
<i>Clarias gariepinus</i>				<i>Oreochromis niloticus</i>			
Couleur	Taille (mm)	Fra	%	Couleur	Taille (mm)	Fra	%
Blanche pâle	1 -2,3	2	40	Blanche	1,4	2	100
Noire	1,2 – 2,4	3	60	-	-	-	-
Total		5	100	Total		2	100

Légende: Fra = Fréquence absolue, % = pourcentage et - = néant

Les débris identifiés dans les tubes digestifs de poissons capturés à Maluku présentent une perte de coloration. Trois couleurs des microplastiques (blanche pâle, blanche et noire) sont identifiées dans les tubes digestifs des poissons dont le plus grand nombre des débris (deux) chez *Clarias gariepinus* et une seule couleur chez *Oreochromis niloticus* de taille variante entre 1 et 2,4 mm. En termes de proportion d'observation des débris identifiés, les plastiques de couleur noire sont les plus abondants (60%) que ceux de la couleur blanche pâle (40%). Par contre chez *Oreochromis niloticus* tous les débris identifiés sont de couleur blanche.

4.4.6.2 SITE DE KINKOLE

Le tableau 15 reprend les différentes couleurs et tailles des microplastiques identifiés dans les tubes digestifs de poissons *Clarias gariepinus* et *Oreochromis niloticus* récoltés à Kinkole.

Tableau 14. Couleurs et tailles des microplastiques identifiés dans les poissons *Clarias gariepinus* et *Oreochromis niloticus* pêchés à Kinkole

Espèces de poissons							
<i>Clarias gariepinus</i>				<i>Oreochromis niloticus</i>			
Couleur	Taille (mm)	Fra	%	Couleur	Taille (mm)	Fra	%
Blanchâtre	1,2 – 2,1	7	70	Blanche	1,6 - 4	10	55,5
Noirâtre	2,0 – 3,2	2	20	Brune	1,6	1	5,5
Blanche	1,3	1	10	Noire	1,3 – 2,4	2	11,1
-	-	-	-	Blanchâtre	3,1 - 4	2	11,1
-	-	-	-	Noirâtre	2,4 – 3,1	2	11,1
-	-	-	-	Noire tacheté	4,2	1	5,5
Total		10	100	Total		18	99,8

Légende: Fra = Fréquence absolue, % = pourcentage et - = néant

Les tubes digestifs de spécimens de poissons *Oreochromis niloticus* pêchés à Kinkole présentent un nombre élevé des débris plastiques que ceux de poissons *Clarias gariepinus*. Au total, six couleurs (noirâtre, blanche, brune, noire, blanchâtre et noire tacheté) de microplastiques sont mises en évidence. La taille des débris varie entre 1,2 et 4,2 mm avec un nombre élevé (18) observé des microplastiques chez *Oreochromis niloticus*. Chez *C. gariepinus*, les débris de taille comprise entre 1,2 et 2,1 mm avec 70% sont les plus abondants tandis que chez *O. niloticus*, les déchets de taille comprise entre 1,6 et 4 mm avec 55,5% sont les plus représentatifs.

4.4.6.3 SITE DE KINGABWA

Les informations relatives à la couleur et à la taille des microplastiques identifiés dans les tubes digestifs de poissons récoltés à la station de Kingabwa dans le Pool Malebo (fleuve Congo) sont reprises au tableau 16.

Tableau 15. Couleurs et tailles des microplastiques identifiés dans les poissons *Clarias gariepinus* et *Oreochromis niloticus* pêchés à Kingabwa

Espèces de poissons							
<i>Clarias gariepinus</i>				<i>Oreochromis niloticus</i>			
Couleur	Taille (mm)	Fra	%	Couleur	Taille (mm)	Fra	%
Blanchâtre	1,3 – 12,2	8	36,3	Blanchâtre	0,8 - 4	3	27,2
Noire	0,9 – 4,8	6	27,2	Blanche pâle	2 – 3,1	5	45,4
Jaune pâle	0,7	1	4,5	Noire	0,4 - 7	2	18,1
Brune	2,4 - 4	3	13,6	Incolore	1,6	1	9
Blanche pâle	1,6 – 5,2	4	18,1	-	-	-	-
Total		22	99,7	Total		11	99,7

Légende: Fra = Fréquence absolue, % = pourcentage et - = néant

A Kingabwa, le nombre le plus élevé (22 débris) de microplastiques sont observés dans les tubes digestifs des poissons *Clarias gariepinus* que chez les poissons *Oreochromis niloticus* (11 débris). Les couleurs des débris varient de blanchâtre, noire, jaune pâle, brune, blanche pâle et incolore de taille comprise entre 0,4 et 2,4 mm. Les débris de taille comprise entre 1,3 et 12,2 mm avec 36,3% sont les plus nombreux chez *C. gariepinus* suivis de ceux de taille allant de 0,9 à 4,8 mm (soit 27,2%). Chez *O. niloticus*, les débris de taille allant de 2 à 3,1 mm avec 45,4% sont les plus nombreux suivis de ceux de taille comprise entre 0,8 et 4 mm.

4.4.6.4 SITE DE KINSUKA

Les résultats obtenus sur la couleur et la taille des microplastiques identifiés dans les tubes digestifs des poissons *Clarias gariepinus* et *Oreochromis niloticus* pêchés à la station de Kinsuka sont repris au tableau 17.

Tableau 16. Couleurs et tailles des microplastiques identifiés dans les poissons *Clarias gariepinus* et *Oreochromis niloticus* pêchés à Kinsuka

Espèces de poissons							
<i>Clarias gariepinus</i>				<i>Oreochromis niloticus</i>			
Couleur	Taille (mm)	Fra	%	Couleur	Taille (mm)	Fra	%
Blanche	5,1	1	25	Blanchâtre	1 - 4,1	2	15,3
Blanchâtre	4,8	1	25	Noire	1,2	1	7,6
Brune	1,3 – 3,2	2	50	Noirâtre	4,9	1	7,6
-	-	-	-	Blanche	0,4 – 5,2	8	61,5
-	-	-	-	Rouge bordeaux	1,4	1	7,6
Total		4	100	Total		13	99,6

Légende: Fra = Fréquence absolue, % = pourcentage et - = néant

Le plus grand nombre (13 débris) des microplastiques est relevé dans les tubes digestifs de poissons *Oreochromis niloticus* que dans les spécimens de *Clarias gariepinus* (4 débris). Sur les six couleurs (blanche, blanchâtre, brune, noire, noirâtre et rouge bordeaux) des débris mis en évidence, la majorité des couleurs sont observées dans les débris identifiés dans les poissons *O. niloticus*. En termes de tailles, les microplastiques identifiés à Kinsuka présentent de tailles comprises entre 0,4 et 5,1 mm avec une prédominance (soit 50%) des débris de taille comprise entre 1,3 et 3,2 mm chez *C. gariepinus*. Chez *O. niloticus*, les déchets de taille allant de 0,4 et 5,2 mm avec 61,5% sont les plus abondants.

4.4.7 ABONDANCE RELATIVE DES FORMES DES MICROPLASTIQUES IDENTIFIES

4.4.7.1 SUR LA SURFACE D’EAU

Trois formes des microplastiques recensés sur la surface des eaux du fleuve Congo dans le Pool Malebo sont mises en évidence. La forme filamenteuse est la plus représentée (68,6%) suivie des formes irrégulière (22%) et sphérique (9,32%) (figure 17). Dans la catégorie des filaments il y a les fibres synthétiques dont les mèches et les filets en nylon ainsi que les sacs en polyéthylène en cours de décomposition.

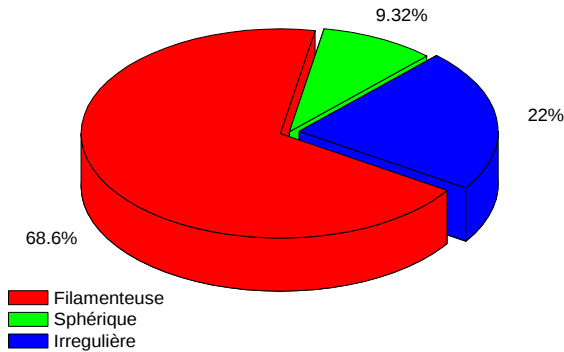


Fig. 17. Différentes formes des microplastiques identifiées sur la surface du fleuve Congo (Pool Malebo)

4.4.7.2 DANS LES SÉDIMENTS

Les microplastiques identifiés dans les sédiments du Pool Malebo (fleuve Congo) présentent quatre formes différentes. La majorité des microplastiques sont de forme filamenteuse (41,6%), irrégulière (33,7%), sphérique (15,8%) et elliptique (8,91%) (figure 18).

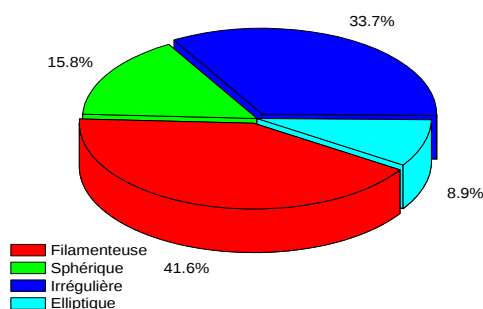


Fig. 18. Différentes formes des microplastiques identifiées dans les sédiments du fleuve Congo (Pool Malebo)

4.4.7.3 DANS LES TUBES DIGESTIFS DES POISSONS

Sept formes des microplastiques identifiées dans les tubes digestifs des poissons *Clarias gariepinus* et *Oreochromis niloticus* pêchés dans les différentes stations du Pool Malebo dans le fleuve Congo sont mises en évidence. Les particules de forme filamenteuse avec 39 débris soit 45,9% sont dominantes suivies de celles qui ont la forme irrégulière avec 18,8% soit 16 débris, bâtonnet avec 15,3% soit 13 débris et sphérique avec 12,9% soit 11 débris (figure 19). Les microplastiques des autres formes sont moins représentatifs.

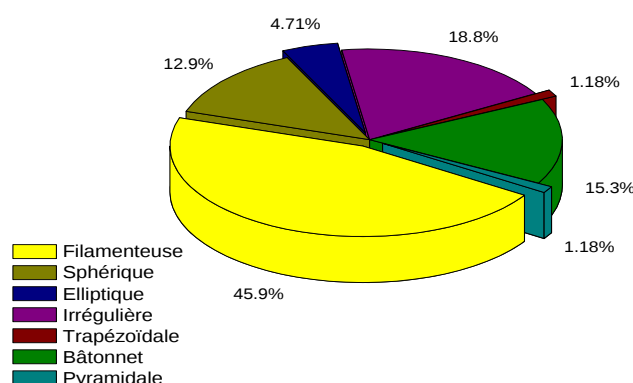


Fig. 19. Différentes formes des microplastiques identifiées dans les tubes digestifs de poissons *Clarias gariepinus* et *Oreochromis niloticus* pêchés dans le fleuve Congo (Pool Malebo)

5 DISCUSSION

La préservation des réserves mondiales d'eau douce ainsi que la qualité de l'eau potable sont des enjeux planétaires majeurs. Plusieurs facteurs menacent l'intégrité de cette ressource (Beauchemin, 2015). La République Démocratique du Congo ne fait pas exception à la règle. Les rives du Pool Malebo sont aussi vulnérables à la présence de la pollution plastique dans ses eaux. Dans le milieu naturel, les macros et les microplastiques sont dégradés en particules plus petites par le jeu de facteurs biotiques et abiotiques (Schäfer, 2015). La dégradation totale est cependant extrêmement longue, de sorte que la plupart des plastiques sont considérés comme persistants (Faure & De Alencastro, 2014; Schäfer, 2015). L'action des agents abiotiques est la première étape de ce processus. Elle est très importante puisqu'elle entraîne la perte des propriétés mécaniques des matériaux et une modification profonde de la structure moléculaire (Ryan *et al.*, 2009). La matrice polymère se disloque, libérant des fragments de différentes tailles et toutes sortes d'additifs. En conditions naturelles, la photolyse est l'une des principales causes de dégradation (Schäfer, 2015). Par la rupture des chaînes polymériques et diverses réactions chimiques, les matériaux deviennent poreux et instables. La photodégradabilité du plastique dépend alors de sa composition (Beauchemin, 2015). La structure des polymères peut être détruite par thermolyse, oxydation, hydrolyse ou par l'action mécanique des forces de cisaillement. La vitesse et le degré de dégradation dépendent fortement des propriétés des polymères: ceux qui comportent des liaisons ester (comme le polyuréthane) peuvent être attaqués par des estérases (Lambert *et al.*, 2014). En conférant au matériau un caractère plus ou moins hydrophobe, la composition du polymère influe également sur la capacité des microorganismes à se fixer à sa surface et donc à participer à la dégradation. La composition et la complexité

de la structure polymérique déterminent donc la biodégradabilité des plastiques (Goverse et Bech, 2011). Ceux qui sont composés d'unités courtes et répétitives, qui présentent une grande symétrie et de fortes liaisons hydrogène (le PE, le PP et le PET par ex.) sont moins accessibles aux enzymes et donc plus stables (Browne *et al.*, 2013). La minéralisation par les microorganismes ne peut commencer qu'une fois les molécules sont suffisamment petites, c'est-à-dire lorsque les monomères et oligomères solubles dans l'eau peuvent être libérés (Faure & De Alencastro, 2014).

Les paramètres physiques et chimiques des eaux du fleuve Congo dans le Pool Malebo mesurés dans le cadre de cette étude contribuent de manière générale à la désintégration des déchets plastiques (macroplastiques) en micro plastiques. Les résultats obtenus sur les paramètres physiques ont montré que les eaux du fleuve Congo sont chaudes à travers les sept sites d'étude retenus dans le Pool Malebo. La température moyenne en surface se situe entre $26,15 \pm 0,93^\circ\text{C}$ et $29,75 \pm 0,75^\circ\text{C}$. Les valeurs les plus élevées de température ont été enregistrées aux sites de Baramoto ($29,75 \pm 0,75^\circ\text{C}$) et de Maluku ($28,5 \pm 0,65^\circ\text{C}$) et la plus faible valeur de température a été relevée à Kingabwa ($26,15 \pm 0,93^\circ\text{C}$) à l'affluent de la rivière N'djili. Les résultats de la présente à ce paramètre sont proches de ceux relevés par Pwema (2014); Tembeni (2017); Pwema *et al.*, (2024) (température moyenne de l'eau de surface qui était de $28,9 \pm 0,18$ et $29,3 \pm 0,13^\circ\text{C}$). Tembeni (2017) fait savoir que les moyennes annuelles de la température de l'eau mesurées pendant une période de cinq ans (2009-2013) oscille autour de $26,4 \pm 1,39^\circ\text{C}$ en surface et de $26 \pm 1,46^\circ\text{C}$ en profondeur, avec des minima et maxima thermiques respectifs de 23°C et de $27,5^\circ\text{C}$ en surface comme en profondeur. La variation du potentiel d'hydrogène a montré que ces eaux sont légèrement acides (pH compris entre $5,97 \pm 0,12$ à Kinkole et $6,72 \pm 0,12$ à Kinsuka à l'île Ledia). Ces observations sont proches de celles faites par Pwema (2014); Pwema *et al.*, (2024). D'après ces derniers, les eaux du fleuve Congo à la station de Kinkole sont légèrement acides (pH compris entre $6,27 \pm 0,11$ et $6,62 \pm 0,28$). Pwema (2014) a relevé des valeurs moyennes de potentiel d'hydrogène comprises entre $6,1 \pm 0,2$ (Kinkole) et $6,3 \pm 0,4$ (Kinsuka). La conductivité électrique est restée faible de manière générale; elle a oscillé entre $22,5 \pm 3,75 \mu\text{S/cm}$ (Maluku) et $70 \pm 20 \mu\text{S/cm}$ (Baramoto). Les moyennes de la conductivité relevées dans cette étude sont proches de celles obtenues par Tembeni (2017). Ce dernier a dans son étude obtenu une conductivité annuelle de $39,9 \pm 5,4 \mu\text{S/cm}$ variant entre un minimum de $37,4 \mu\text{S/cm}$ à la station de Kinkole et un maximum de $43,48 \mu\text{S/cm}$ à la station de Kinsuka. Pwema (2014) de son côté fait remarquer que d'une manière générale, les valeurs de la conductivité de l'eau du fleuve Congo au Pool Malebo sont faibles et oscillent entre 28,9 et $35,8 \mu\text{S/cm}$. Ceci est due au fait que les eaux courantes du fleuve Congo charrient les matières organiques et inorganiques dissoutes dans l'eau (Pwema, 2014). Les solides totaux dissous ont été en faible concentration dans l'eau du fleuve Congo. Les valeurs moyennes de la turbidité se sont situées entre $11 \pm 1,5 \text{ ppm}$ (Maluku) et $34,5 \pm 10,5 \text{ ppm}$ (Baramoto) et sont proches de celles obtenues par Pwema *et al.*, (2024). Ces derniers ont relevé des valeurs moyennes de turbidité comprises entre $13,73 \pm 0,1 \text{ ppm}$ et $14,21 \pm 0,38 \text{ ppm}$. La mise en suspension des particules organiques et minérales allochtones est liée à l'afflux des masses d'eaux des affluents du fleuve Congo dans le Pool Malebo et à celui des plaines inondables dans le cours principal par le courant d'eau suivant les observations faites par Lambert *et al.*, (2016).

En ce qui concerne les paramètres chimiques des eaux du fleuve Congo, les analyses des échantillons ont montré que la concentration moyenne en nitrite a varié entre $0,03 \pm 0,01 \text{ mg/L}$ à Maluku et $0,2 \pm 0,04 \text{ mg/L}$ à Kingabwa. La teneur moyenne en nitrate varie entre $0,39 \pm 0,04 \text{ mg/L}$ (Maluku) et $1,2 \pm 0,07 \text{ mg/L}$ (Baramoto). Ces résultats corroborent avec ceux obtenus par Tembeni (2017). Dans son étude, ce dernier fait savoir que les concentrations en nitrates ont été relativement stables entre 2009 et 2013, avec un minimum de $0,08 \text{ mg/L}$ et un maximum de $0,1 \text{ mg/L}$. La concentration moyenne en ions phosphate s'est située entre $0,8 \pm 0,12 \text{ mg/L}$ (Maluku) et $1,42 \pm 0,16 \text{ mg/L}$ (Baramoto). D'après les observations faites par Pwema (2014), les valeurs des ions majeurs (Mg^{++} , Ca^{++} , K^+ , Cl^- , SO_4^{--} , PO_4^{--} etc.) varient très peu d'un site à un autre. La minéralisation évolue dans le même sens que la conductivité. Tembeni (2014) a obtenu une concentration minimale des ions phosphates de $1,20 \text{ mg/L}$ avec une maximale de $1,31 \text{ mg/L}$.

En ce qui concerne les types de macroplastiques observés sur les sites d'étude (sur la surface de l'eau comme le long des berges) suivant leur composition chimique, six groupes des déchets plastiques ont été identifiés le long du Pool Malebo dans le fleuve Congo et, tous les groupes ont été présents à travers tous les sites d'échantillonnage. Du point de vue abondance numérique, les déchets ont été observés à des fréquences variables d'un site à l'autre. Le PET a été recensé dans tous les sites mais il est plus abondant à Kinsuka (Île Ledia: 50% et à l'hôpital de la Rive: 40%), Kingabwa (à l'affluent de la rivière N'djili: 45%), Baramoto (à l'affluent de la rivière Kalamu: 30%) et Baramoto (au port de l'OCC: 30%).

Les PELD ont été plus abondants à Maluku (60%) et Kinkole (50%) et moins abondants à Baramoto (à l'affluent de la rivière Kalamu: 30%). Les PEHD ont été plus abondants à Baramoto (à l'affluent de la rivière Kalamu: 40%), à Kingabwa (à l'affluent de la rivière: 25%) et Kinsuka (Hôpital de la Rive: 25%). Par contre, les PS sont absents à Maluku et moins abondants sur les autres sites. La prédominance de ces différents types de déchets dans les sites prospectés est étroitement liée aux activités anthropiques qui, sont responsables des rejets de ces résines plastiques. Le niveau de vie social des populations riveraines du Pool Malebo est l'un des facteurs clés qui contribue à l'abondance des déchets notamment les bouteilles en plastique (jus et eau de boisson) qui sont identifiés en masse dans les sites compris entre Kingabwa et Kinsuka. Ces résultats sont très proches

de ceux obtenus par Massain et Jeanniot (2011); Masua *et al.* (2023). Ces derniers ont relevé la présence de sept (7) types des macroplastiques dont le Polyéthylène haute densité (PEHD), Polyéthylène basse densité (PELD), Polyéthylène téréphtalate (PET), Polypropylène (PP), Polystyrène (PS), Polychlorure de vinyle (PVC) et Acétate de cellulose (CA). En outre, ces auteurs ont relevé la présence de toutes les catégories des déchets plastiques à travers trois sites d'étude retenus le long de la rivière N'djili à Kinshasa. Masua *et al.* (2023) font aussi savoir que les déchets plastiques de type PET (27,23%), PELD (26,79%), PEHD (18,88%) et PP (13,32%) sont les plus nombreux sur les sites d'échantillonnage.

Ces observations ont aussi été faites par PUK (2008); Kassay (2015); ONU-Environnement (2018). Massain et Jeanniot (2011) signalent la présence massive de polyéthylène basse densité, polyéthylène téréphtalate, polypropylène et polystyrène dans les rues, caniveaux et cours d'eaux de Kinshasa. Kassay (2015) relève qu'une simple observation dans les quartiers de Kinshasa permet de constater que les espaces publics ne présentent pas un visage de fête. La présence de différents déchets plastiques dans le fleuve Congo serait due aux activités anthropiques (le commerce au bord du fleuve, les rejets des déchets ménagers et autres) qui ont été observés le long du Pool Malebo. Le tronçon du Pool Malebo compris entre le site de Kinkole jusqu'au site de Kinsuka est localisé dans une zone à forte concentration humaine, longé par des habitations et industries à proximité des berges du fleuve. Cette proximité et occupation par les kinois seraient à la base de la plus forte prolifération des déchets plastiques dans cette partie du fleuve Congo par rapport au site de Maluku. Ntirumenyerwa (2019) dans son étude sur les défis des récentes réglementations en la matière sur la pollution plastique en République Démocratique du Congo fait savoir que les rivières traversant la ville de Kinshasa est submergée par des déchets plastiques divers et, les eaux ruissellent difficilement dans certaines rivières. A Kinshasa, les immondices (déchets ménagers et autres) sont jetés dans les rues, poubelles, les caniveaux et surtout dans les cours d'eaux qui traversent la ville. Lors des prospections sur terrain dans le cadre de cette étude, les déchets plastiques ont été observés soit dans les abords ou directement dans le fleuve Congo. Les rivières dans leur ensemble sont des vecteurs importants des déchets plastiques vers le fleuve Congo et, contribuent ainsi à la contamination de différents compartiments du fleuve. Schäfer (2015) affirme que les fleuves sont des vecteurs importants de microplastiques et contribuent ainsi à la pollution des mers. Le constat fait dans cette étude est que les rivières N'djili, Kalamu, Gombe et autres petits cours d'eaux qui traversent la ville de Kinshasa pour se jeter dans le fleuve Congo sont les grands transporteurs des déchets plastiques dans le Pool Malebo.

Les microplastiques ont été mis en évidence dans trois compartiments du fleuve Congo: la surface de l'eau, le sédiment et les poisons *Clarias gariepinus* Burchell, 1822 et *Oreochromis niloticus* Linné, 1758. A la surface de l'eau, 118 échantillons de microplastiques ont été récoltés et identifiés. La majorité des débris ont été recensés aux sites de Kingabwa soit 31 microplastiques, port OCC soit 29 microplastiques, Baramoto soit 24 microplastiques et Kinkole soit 20 microplastiques. Du point de vue abondance, les microplastiques de type PELD ont été plus abondants avec 49 microplastiques soit 41,5% suivis des PS avec 29 microplastiques soit 24,6%, PET avec 18 microplastiques soit 15,3%, PEHD avec 12 microplastiques soit 10,2% et les PP avec 10 microplastiques soit 8,47%. Ces observations rencontrent celles faites par Mutombo (2024). Ce dernier a pu identifier des débris divers des macros et microplastiques à la surface de la rivière N'djili à Kinshasa. Selon Beauchemin (2015), les types de plastique composant les microplastiques possèdent différentes densités et peuvent donc se retrouver partout dans la colonne d'eau ainsi que dans les sédiments et sur les rives (Engler, 2012). Dans les sédiments, les microplastiques du type PELD avec 53 microplastiques soit 52,5% ont été les plus recensés de tous les sédiments de tous les sites suivis de PS avec 19 microplastiques soit 18,8%, PEHD avec 12 microplastiques soit 11,9%, PET avec 11 microplastiques soit 10,9% et PP avec 6 microplastiques soit 5,94%. Les sédiments du site de Kingabwa ont présenté un nombre élevé des microplastiques tandis que les sédiments du site de Kinsuka ont présenté un nombre faible des microplastiques. La faible proportion des débris plastiques inventoriés à Kinsuka serait liée au type de sédiment de ce site, constitué à 90% d'un fond rocheux. Ce type de substrat contribue à ce que les débris plastiques soient entraînés avec le courant d'eau sans pour autant se déposer au fond. Ces résultats s'accordent avec les observations faites par plusieurs chercheurs dont Beauchemin (2015); Leclercq (2015); Roclin (2015) et tant d'autres qui, signalent la présence des débris plastiques dans l'eau, le sédiment et la chaîne alimentaire dans sa globalité.

Au lac Léman en Suisse, des chercheurs ont également démontré la présence de microplastiques dans l'eau et sur les plages (Faure *et al.*, 2012). Dans un premier état des lieux des eaux suisses mené sur mandat de l'Office Fédéral de l'Environnement dans le Léman, les lacs de Constance, de Neuchâtel, de Brienz et de Zurich, le lac Majeur et le Rhône, ils ont observé des microparticules dans la plupart des échantillons et en ont recensé en moyenne 91.000/km² de superficie lacustre et 1.300/m² de plage (Faure & De Alencastro, 2014). Le matériau le plus fréquent était le polyéthylène suivi par le polypropylène et le polystyrène (Schäfer, 2015). Une étude menée à Tamise en grande Bretagne, signale des microplastiques observés dans les sédiments à des concentrations atteignant 800 particules par litre d'eau sur la totalité des 10 sites concernés par une étude (Horton *et al.*, 2015). En Belgique, près de 400 microparticules par kilo ont été trouvées dans les sédiments portuaires (Claessens *et al.*, 2011) tandis que les Hollandais en découvriraient près de 3.300 par kilo dans les sédiments de l'embouchure

du Rhin (Leslie *et al.*, 2013). A défaut de déterminer la concentration des particules plastiques, toutes ces observations réconfortent le constat fait dans la présente étude sur la présence des microplastiques dans l'eau et le sédiment du Pool Malebo.

Dans les tubes digestifs de poissons *Clarias gariepinus*, 41 débris de microplastiques ont été identifiés pour tous les spécimens de poissons. Deux catégories de microplastiques ont intégré les tubes digestifs des poissons dont: les polyéthylènes à basse densité (PELD) avec 34 débris soit 82,9% et les polypropylènes (PP) avec 7 débris soit 17%. Au niveau de site de récolte, les poissons les plus contaminés par les débris plastiques sont ceux qui ont été échantillonnés à Kingabwa avec 53,6% et Kinkole avec 24,3%. Les tubes digestifs des poissons *Oreochromis niloticus* récoltés dans les mêmes sites ont été aussi contaminés par deux types de microplastiques: PELD et PP. Du point de vue abondance relative des déchets, les PELD avec 35 débris soit 79,5% ont été les plus nombreux que les PP avec 9 débris soit 20,4%. Au niveau des sites de pêche, les poissons échantillonnés au site de Kinkole avec 18 débris identifiés soit 40,9% ont ingéré en abondance les microplastiques que les poissons récoltés à Kinsuka avec 13 débris soit 29,5%, Kingabwa avec 11 débris soit 25% et Maluku avec 2 débris soit 4,5%. Nos résultats confirment les observations soulevées par Bocquené (2013); Farrell & Nelson (2013); Lusher (2013); Gassel *et al.*, (2013) et tant d'autres. En termes de nombre des débris identifiés dans les tubes digestifs de deux espèces de poissons sous étude, les tubes digestifs de poissons *O. niloticus* ont présentés plus des débris des microplastiques (44 au total) que les poissons *C. gariepinus* (41 au total). Cette différence serait liée à l'habitat occupé par les poissons et à la densité des microplastiques après fragmentation. Le poisson *O. niloticus* étant un poisson pélagique a la facilité d'attraper facilement en grand nombre les débris plastiques à faibles densités tandis que le poisson *C. gariepinus*, un poisson benthique, a plus de chance d'ingéré que les débris plastiques qui précipitent vers le fond du fleuve Congo. Des chercheurs ont recensé davantage de particules de moins de 5 cm que de larves de poisson en moyenne sur deux ans (Schäfer, 2015). La dimension des microplastiques est proche de celle de nombreuses espèces de plancton et les scientifiques partent de l'hypothèse que les organismes planctonivores, filtreurs et suspensives ingèrent passivement des microplastiques lorsqu'ils s'alimentent (Wright *et al.*, 2013). De plus, une fois qu'ils se sont déposés dans les sédiments, les microplastiques peuvent également être ingérés accidentellement par des organismes détritivores (Murray & Cole *et al.*, 2011; Thompson *et al.*, 2004), dont les holothuries (Graham & Thompson, 2009). On peut supposer que l'ingestion de microplastiques a les mêmes conséquences sur ces organismes que celles qu'on observe sur les vertébrés ayant absorbé des débris de plastique de plus grande dimension: abrasions et ulcères internes ou externes, obstruction du tube digestif, qui compromettent la capacité des animaux à se reproduire et entraînent une augmentation des taux de mortalité naturelle (Graham & Thompson, 2009). Les animaux deviennent plus susceptibles de se noyer, vulnérables face à leurs prédateurs et présentent des difficultés pour s'alimenter normalement (Wright *et al.*, 2013). Les sources potentielles des microplastiques, principalement secondaires, sont les déchets qui sont jetés dans la nature, perdus accidentellement ou entraînés par le vent ainsi que les décharges d'ordures et certaines activités industrielles (Markic & Nicol, 2014). Comme dans les Grands lacs, il s'agit en majorité de polystyrène, de polyéthylène et de polypropylène et en moindre mesure de polyamide et de polychlorure de vinyle (Schäfer, 2015).

La question du transfert trophique et de la contamination potentielle des produits de la mer par ces particules synthétiques est tout à fait récente. Bocquené (2013) a successivement étudié le transfert trophique des microplastiques de la moule au crabe, puis la présence de ces microparticules dans le tractus digestif de poissons destinés à l'alimentation humaine capturés en Mer et enfin la présence de contaminants chimiques dans la chair de poisson, liée à l'ingestion de débris plastiques (Bocquené, 2013). Il a été démontré dans cette étude que les microplastiques contaminent les poissons de toutes les classes de taille. Chez les poissons *Clarias gariepinus*, les individus regroupés dans la deuxième classe de taille (avec 19 individus contaminés soit 46%), ceux de la première classe (avec 11 individus contaminés soit 27%) et la troisième classe (avec 9 individus soit 22%) ont présenté des proportions élevées de contamination. Chez *Oreochromis niloticus*, ce sont les spécimens de classe II (avec 18 spécimens contaminés soit 41%), classe III (avec 10 spécimens contaminés soit 23%) et classe IV (avec 7 individus contaminés soit 16%) qui ont présenté de cas élevé de contamination par les débris plastiques. Farel *et al.*, (2013) révèlent que chez les organismes filtreurs tels que la moule bleue (*Mytilus edulis*), certaines microparticules de plastique d'une taille de l'ordre de 10 µm ont la faculté de pénétrer le système circulatoire à partir de l'intestin. Plusieurs auteurs dont Bocquené (2013); Lusher *et al.*, (2013); Gassel *et al.*, (2013) font savoir que les micro déchets plastiques ont la capacité d'être transférés, lors de l'absorption d'espèces contaminées, vers des niveaux trophiques supérieurs. Cette contamination ne concerne pas seulement le système digestif mais aussi d'autres organes ou fluides biologiques vitaux (Bocquené, 2013).

L'action des agents abiotiques est la première étape dans le processus de dégradation des plastiques. Elle est très importante puisqu'elle entraîne la perte des propriétés mécaniques des matériaux et une modification profonde de la structure (taille) y compris la couleur (Schäfer, 2015). Les microplastiques identifiés à la surface des eaux du fleuve Congo dans le Pool Malebo ont présenté six couleurs (blanche, blanche pâle, brune, noire, bleu foncé et noire-tacheté) et des tailles comprises entre 0,14 mm et 43,72 mm. En termes d'abondance, les microplastiques de couleur noire (26,27%), blanche pâle (24,57%),

brune (19,49%) et bleu foncé (13,55%) sont les plus nombreux. Dans les sédiments, les microplastiques ont présenté cinq types de couleurs (blanche, blanche pâle, noire, bleu pâle et jaune pâle) avec des tailles comprises entre 0,18 mm et 54,8 mm. Les microplastiques de couleur noire ont été plus abondants (43,56%) suivis de ceux de la couleur blanche pâle (32,67%) et blanche (10,89%). Diverses couleurs (noirâtre, blanche, brune, noire, blanchâtre et noire tacheté), tailles et formes de microplastiques ont été mises en évidence dans les tubes digestifs de poissons récoltés à travers les sites de récolte. Ces observations sur les différentes tailles et couleurs des débris observés montrent à suffisance que les déchets plastiques subissent un processus de dégradation dans le fleuve Congo et sont susceptibles de se fragmenter en microplastiques.

Donc, le repas touristique des Maboke préparé souvent avec les poissons d'eau douce étudiés dans cette étude implique d'autres réflexions pour ne pas décourager les touristes et réduire le flux touristique au sein des sites touristiques récréatifs situés le long du pool Malebo à Kinshasa.

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude avait pour objectif d'inventorier les différents types des microplastiques dans les trois compartiments (eaux, sédiments et poissons) du fleuve Congo dans la partie du Pool Malebo entre les stations de pêche de Maluku et Kinsuka à Kinshasa. La recherche des microplastiques a été faite dans l'eau (piégeage avec le filet de Manta), le sédiment et les tubes digestifs de deux espèces de poissons (*Clarias gariepinus* Burchell, 1822 et *Oreochromis niloticus* Linné, 1758). L'identification et la classification des débris plastiques recensés dans les trois compartiments du fleuve Congo ont été faites sur base de la densité des microplastiques.

Les résultats obtenus ont montré que:

- Les paramètres physiques et chimiques des eaux du fleuve Congo dans le Pool Malebo relevés dans le cadre de cette étude contribuent de manière générale à la désintégration des déchets plastiques (macroplastiques) en micro plastiques;
- Six (6) types de macroplastiques ont été observés et identifiés à la surface de l'eau comme le long des berges et, tous ceux-ci ont été présents à travers tous les sites d'échantillonnage. Du point de vue abondance numérique, les déchets ont été observés à des fréquences variables d'un site à l'autre avec une prédominance de PET, PELD et PEHD;
- Les rivières N'djili, Kalamu, Gombe, Makelele et autres cours d'eaux qui traversent la ville de Kinshasa pour se jeter dans le fleuve Congo sont les grands transporteurs des déchets plastiques dans le Pool Malebo;
- A la surface de l'eau, 118 débris de microplastiques ont été récoltés et identifiés. La majorité des débris ont été recensés aux sites de Kingabwa, port OCC, Baramoto et Kinkole. Les microplastiques du type PELD ont été les plus recensés dans les sédiments de tous les sites suivis de PS, PEHD, PET et PP. Les sédiments du site de Kingabwa ont présenté un nombre élevé des microplastiques tandis que les sédiments du site de Kinsuka ont présenté un nombre faible des microplastiques;
- Dans les tubes digestifs de poissons *Clarias gariepinus*, 41 débris de microplastiques regroupés en deux catégories (polyéthylènes à basse densité et les polypropylènes) ont été identifiés pour tous les spécimens de poissons. Les PELD avec 34 débris soit 82,9% ont été plus observés que les PP avec 7 débris soit 17%. Au niveau des sites de récolte, les poissons les plus contaminés par les débris plastiques sont ceux qui ont été échantillonnés à Kingabwa avec 53,6% et Kinkole avec 24,3%;
- Les tubes digestifs des poissons *Oreochromis niloticus* récoltés dans les mêmes sites ont été aussi contaminés par deux types de microplastiques (PELD et PP). Du point de vue abondance relative des déchets, les PELD avec 35 débris soit 79,5% ont été les plus nombreux que les PP avec 9 débris soit 20,4%. Au niveau de site de pêche, les poissons échantillonnés au site de Kinkole avec 18 débris identifiés soit 40,9% ont ingéré en abondance les microplastiques que les poissons récoltés à Kinsuka, Kingabwa et autres sites;
- Les microplastiques contaminent les poissons de toutes les classes de taille.

Cette étude suggère ce qui suit:

- Mettre en place un système efficace de gestion écologique des déchets;
- Ecologiser les Kinois et les industriels par des sensibilisations hors et publiés médias;
- Financer les projets de gestion des déchets à travers la ville;
- Appliquer les lois sur la gestion de l'environnement, la gestion des déchets et l'assainissement en général.

REFERENCES

- [1] Andrady A.L., 2011. Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*. 62, 1596-1605.
- [2] Andrady A.L., 2017. Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 122 (1-2): 9-22.
- [3] Barhalengehwa B., Akonkwa B., Lina A., Lushombo M. et Mulongaibalu M., 2019. Régime alimentaire des *Clarias gariepinus* (Burchell, 1882) (Claridae; Teleostei) dans le réservoir de Nyangara, bassin du lac Tanganyika à Uvira (Sud-Kivu). *Anale des sciences et des sciences appliquées*, 4 (4): 237-255.
- [4] Barnes D.K.A., Galgani F., Thompson R.C. and Barlaz M., 2009. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*. 364: 1985-1998.
- [5] Barrows A.P.W., Cathey S.E., Petersen C.E. & Petersen J.K., 2018. Microplastics in marine organisms: environmental and biotoxic effects. *Microplastic Contamination in Aquatic Environments*, Elsevier., 123-145.
- [6] Bertolini G., 1996, Recherche sur les déchets en économie et en sociologie: un état de l'art, in Déchet-Sciences et Technique, n°s 2 et 3.
- [7] Bocquené G., 2013. Intégration des micro-déchets plastiques dans la chaîne trophique marine et dans les produits de la mer: une voie d'exposition du consommateur aux polluants chimiques. *Anses, Bulletin d'éveil scientifique*, N° 22, Santé/Environnement/Travail, Ifremer – RBE/BE/ARC – Nantes – France, 5 p.
- [8] Boote W. & Pretting G., 2010. Plastic Planet: La face cachée des matières synthétiques. Fribourg: Acte Sud, 249 p.
- [9] Browne M.A., Dissanayake A., Galloway T.S. & Lowe D.M., 2008. Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.). *Environmental Science & Technology*, 42 (13), 5026-5031.
- [10] Browne M.A., Niven S.J. & Galloway T.S., 2013. Microplastic Moves Pollutants and Additives to Worms, Reducing Functions Linked to Health and Biodiversity. *Current Biology*. 23: 2388-2392.
- [11] Claessens M., De Meetser S., Van Landuyt L., Thopson R.C. & Thiel M., 2011. Occurrence and distribution of micro-plastics in marine sediments along the Belgian coast. *Mar. Pollut. Bull*, 62: 2199-2204.
- [12] Claessens M., Van Cauwenberghe L., Vandegehuchte M.B. and Janssen C.R., 2013. New techniques for the detection of microplastics in sediments and field collected organisms. *Marine Pollution Bulletin*. 70, 227-233.
- [13] Cole M., Lindeque P., Halsband C. & Galloway T.S., 2011. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*. doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.09.025.
- [14] Cole M., Lindeque P., Halsband C. and Galloway T.S., 2011. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*. 62, 2588-2597.
- [15] Eriksen M., Lebreton L.C.M., Carson H.S., Thiel M., Moore C.J., Borerro J.C., Galgani F., Ryan P.G., Reisser J., 2014. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. *Plos One*. 9, 15.
- [16] Farrell P. & Nelson K., 2013. Trophic level transfert of microplastic: *Mytilus edulis* to *Carcinus maenas*. *Environ Pollut*, 177: 1-3.
- [17] Farrell P. et Nelson K., 2013. Transfert trophique des microplastiques de la moule (*Mytilus edulis* (L.)) au crabe (*Carcinus maenas* (L.)). *Environ Pollut*, 177: 1-3.
- [18] Faure F. & De Alencastro F., 2014. Evaluation de la pollution par les plastiques dans les eaux de surface en Suisse. *Rapport mandaté par l'Office fédéral de l'environnement*.
- [19] Faure F., Corbaz M., Baecher H. & De Alencastro L.F., 2012. Pollution due to plastics and microplastics in Lake Geneva and in the Mediterranean Sea. *Archives des Science* 65, 157-16.
- [20] Froidevaux S., 2018. Microplastiques dans les poissons du Léman. 10 p.
- [21] Gassel M., Harwani S., Park J.S. & Jahn A., 2013. Detection of nonylphenol and persistent organic pollutants in fish from the North Pacific Central Gyre. *Mar Poll Bull*, 73: 231-42.
- [22] GESAMP (Groupe d'experts des Nations Unies sur les aspects scientifiques de la protection de l'environnement marin), 2016. Microplastics in the oceans. First assessment report. FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection. Récupéré de <http://www.gesamp.org/site/assets/files/1720/rs61e.pdf>.
- [23] GESAMP (Groupe d'experts des Nations Unies sur les aspects scientifiques de la protection de l'environnement marin), 2015, Microplastics in the marine environment. Conséquences and solutions, 96 p.
- [24] Graham E.R. & Thompson J.T., 2009. Deposit- and suspension-feeding sea cucumbers (Echinodermata) ingest plastic fragments. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 368: 22-29.
- [25] Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R.C. & Thiel M., 2012. Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification. *Environmental Science & Technology*. 46, 3060-3075.
- [26] Horton A.A., Lahive E., Svendsen C., Williams R.J., Read D.S. & Spurgeon D.J., 2015. Presence and abundance of micropalstics in the Thames River Basin UK. *Poster presented at SETAC Europe 2015 in Barcelona*.

- [27] INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques), 2014. Surveillance environnementale: La contamination des poissons d'eau douce aux microplastiques. *Rapport scientifique 2013-2014 de l'INERIS, France*, 11 p.
- [28] Kassay N.I.J., 2015. La gestion des déchets plastiques à Kinshasa: un autre défi environnemental à relever dans la conception des villes durables. *Environnement, changement climatique et sécurité alimentaire*, 5: 131-154.
- [29] Laist D.W., 1997. Impacts of marine debris: entanglement of marine life in marine debris including a comprehensive list of species with entanglement and ingestion record. *Marine Debris. Springer*, 99-139.
- [30] Lambert S., Sinclair C. & Boxall A., 2014. Occurrence, degradation, and effect of polymer-based materials in the environment. *Rev Environ Contam Toxicol*. 227: 1-53.
- [31] Lambert T., Bouillon S., Darchambeau F., Massicotte P. & Borges A.V., 2016. Shift in the chemical composition of dissolved organic matter in the Congo River network. *Biogeosciences*, 13, 5405–5420.
- [32] Law K.L., Moret-Ferguson S., Maximenko N.A., Proskurowski G., Peacock E.E., Hafner J. and Reddy C.M., 2010. Plastic Accumulation in the North Atlantic Subtropical Gyre. *Science*. 329, 1185-1188.
- [33] Lazard J., 2009. La pisciculture des tilapias. *Cahiers Agricultures*, 18 (2-3): 393–401.
- [34] Leslie H.A., Van Velzen M.J.M. & Vethaak A.D., 2013. Microplastic survey of the Dutch environment. *Novel data set of microplastics in North Sea sediments*.
- [35] Lusasi S.W., Makiese M.P., Kunonga N.L., Munganga K.C., Kavumbu M.S. et Pwema K.V., 2019. Proportion de vente des poissons frais locaux et importés dans les marchés de Kinshasa en République Démocratique du Congo (cas des marchés de la Liberté de Masina et Central de Kinshasa). *Journal of Applied Biosciences* 141: 14353 – 14363.
- [36] Lusher A.L., McHugh M. & Thompson R.C., 2013. Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tract of pelagic and demersal fish from the English Channel. *Mar Poll Bull*, 67: 94-9.
- [37] Lusher A.L., McHugh M. et Thompson R.C., 2013. Présence de microplastiques dans le tractus gastro-intestinal de poissons pélagiques et demersaux capturés en Manche. *Mar Poll Bull*, 67: 94-9.
- [38] Markic A. & Nicol S., 2014. En bref: Microplastiques et pêche. *Lettre d'information sur les pêches de la CPS n° 144*, 29 p.
- [39] Massain J.C. & Jeannot D., 2011. Recyclage des sachets plastiques à Kinshasa: Un projet d'ingénieurs sans frontières (ISF) Belgique. Coopérant ISF, Kinshasa, R.D. Congo et ISF, Bruxelles, Belgique, 5 p.
- [40] Masua T.B., Lusasi S.W., Munganga K.C., Wumba M.P., Kavumbu M., Pwema K.V., 2020. Inventory of fresh fish marketed in the markets of Kinshasa in the Democratic Republic of Congo (case of the Gambela and Matete markets). *International Journal of Applied Research*. Sous press.
- [41] Moret-Ferguson S., Law K.L., Proskurowski G., Murphy E.K., Peacock E.E. and Reddy C.M., 2010. The size, mass, and composition of plastic debris in the western North Atlantic Ocean. *Marine Pollution Bulletin*. 60, 1873-1878.
- [42] Munganga K.C., Kavumbu M.S., Bipendu M.N., Kunonga N.L., Lusasi S.W. et Pwema K.V., 2020. Evaluation de la Qualité Écologique de la Rivière Musolo à Kinkole Basée sur les Macroinvertébrés Benthiques (Kinshasa, R.D Congo). *European Journal of Scientific Research*. Vol. 155, N° 2, 162 -176.
- [43] Musibono D.E., 2019. Gouvernance de l'environnement mondial: Politiques toxiques et pollution généralisées. Edition Universitaires Européennes, Düsseldorf, 222 9.
- [44] Mutombo T.J., 2020. Inventaire et analyse des impacts négatifs des macroplastiques sur la faune ichthyologique et les activités de pêche dans les cours d'eaux de Kinshasa, R.D Congo: cas de la rivière N'djili. Mémoire de Licence en Sciences de l'Environnement, Université de Kinshasa, R.D Congo, inédit, 62 p.
- [45] Ntirumenyerwa B.P.M., 2019. Combattre la pollution plastique en République Démocratique du Congo: les défis des récentes réglementations en la matière. IUCN WCEL International, Regional and National Reports, 11 p.
- [46] ONU Environnement., 2018. Notre Planète est étouffée par la pollution plastique. Disponible sur <https://www.unenvironment.org/interactive/beat-plastic-pollution/fr/>, consulté le 17 Août 2021.
- [47] Ouattara N.I., Iftime A. et Mester L.E., 2009. Age et croissance de deux espèces de Cichlidae (Pisces): *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) et *Sarotherodon melanotheron* Rüppell, 1852 du lac de barrage d'Ayamé (Côte d'Ivoire, Afrique de l'Ouest). *Travaux du muséum national d'histoire naturelle « Grigore Antipa »*, LII: 313-324.
- [48] PUK (Programme d'Assainissement de Kinshasa), 2008. Salubrité publique en RD Congo: la note stratégique sur le recyclage des déchets plastiques à Kinshasa. Disponible sur <http://www.digitalcongo.net/article/54039>.
- [49] Pwema K.V., 2014. Ecologie alimentaire, reproduction et mode d'adaptation de cinq espèces de *Labeo* Cuvier, 1817 dans les milieux lentique et des rapides au Pool Malebo dans le fleuve. Thèse de Doctorat en Sciences Biologiques, Université de Kinshasa, R.D Congo, 163 p.
- [50] Pwema K.V., Nakweti K.J., Lusasi S.W., Kavumbu M.S., Munganga K.C., Mondo M.T., Tembeni M.J. & Mbomba B.N., 2020. Human endoparasites present in the digestive tracts of two Species of *Cichlidae* Fish: *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) and *Tilapia tholloni* (Sauvage, 1884) caught in the Malebo Pool (Congo River), D.R. Congo. *Agricultural Science*, 2 (2): 129-140. <https://doi.org/10.30560/as.v2n2p129>.

- [51] Rochman C.M., Browne M.A., Halpern B.S., Hentschel B.T., Hoh E., Karapanagioti H.K. & Thompson R.C., 2016. The ecological impacts of marine debris: unraveling the demonstrated evidence from what is perceived. *Ecology*, 97 (2), 302-312.
- [52] Rochman C.M., 2015. Anthropogenic debris in seafood: Plastic debris and fibers from textiles in fish and bivalves sold for human consumption. *Scientific Reports*, 5: 14340.
- [53] Roclin L., 2015. Les microplastiques en milieu marin: supports de contaminants chimiques, Étude bibliographique. Mémoire de Master en Ecologie-Environnement Spécialité Toxicologie de l'environnement, Université du Maine – Le Mans, IFREMER, France, 62 p.
- [54] Ryan P.G., Moore C.J., Van Franeker J.A. et Moloney C.L., 2009. Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*. 364, 1999-2012.
- [55] Saville D.J., 1990. Multiple comparison procedures: the practical solution. *American Statistician*, 44 (2): 174-180.
- [56] Schäfer A., 2015. Les microplastiques dans l'environnement. Fiche d'information, Centre Ecotox, EPFL-ENAC-IIE-GE, Station 2, CH-1015, Lausanne, 5 p. Disponible sur www.centreecotox.ch.
- [57] Scherrer B. 1984. Biostatistique. *Gaëtan Morin: Québec*, 850.
- [58] Tanaka K., Takada H., Yamashita R., Mizukawa K., Fukuwaka M., Watanuki Y., 2013. Accumulation of plastic-derived chemicals in tissues of seabirds ingesting marine plastics. *Marine Pollution Bulletin*. 69, 219-222.
- [59] Tembeni M.T.J., 2017. Structure des communautés des poissons *Mochokidae (Ostariophysi, Siluriformes)* dans le Pool Malebo (Fleuve Congo/R.D. Congo) en relation avec la distribution spatio-temporelle, la niche trophique et la stratégie démographiques. Thèse de Doctorat en Sciences Biologiques, Université de Kinshasa, R.D. Congo, 303 p.
- [60] Thompson R.C., Moore C., Andrady A., Gregory M., Takada H., Weisberg S., 2005. New directions in plastic debris. *Science*. 310, 1117-1117.
- [61] Thompson R.C., Olsen Y., Mitchell R.P., Davis A., Rowland S.J. and John A.W.G., McGonigle D., Russell A.E., 2004. Lost at sea: Where is all the plastic? *Science*. 304, 838-838.

