

UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I
UNIVERSITY OF YAOUNDE I



FACULTÉ DES SCIENCES
FACULTY OF SCIENCE

DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE ANIMALES
DEPARTMENT OF ANIMAL BIOLOGY AND PHYSIOLOGY

LABORATOIRE D'HYDROBIOLOGIE ET ENVIRONNEMENT
LABORATORY OF HYDROBIOLOGY AND ENVIRONMENT

Stygofaune en zones industrielles et non industrielles de la ville de Douala (Cameroun) : Impact de quelques facteurs environnementaux

THÈSE

Présentée et soutenue le 17 janvier 2025 en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat/PhD en Biologie des Organismes Animaux

Option : **Hydrobiologie et Environnement**

Par

POUNTOUGNIGNI Oumarou Farikou

Matricule 07Q836

Master ès-Sciences



Devant le jury composé de :

Président : **NOLA Moïse**, Professeur, Université de Yaoundé I ;

Rapporteurs : **ZEBAZE TOGOUET Serge Hubert**, Professeur, Université de Yaoundé I ;
NGASSAM Pierre, Professeur, Université de Yaoundé I ;

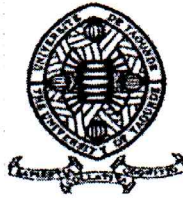
Membres : **AJEAGAH Gideon AGHAINDUM**, Professeur, Université de Yaoundé I ;
ONANA Fils Mamert, Maître de Conférences, Université de Douala ;
PISCART Christophe, Maître de Recherche, CNRS, Rennes ;
NOAH EWOTI Olive Vivien, Maître de Conférences, Université de Yaoundé I.

Année 2025

REPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix - Travail - Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I
FACULTE DES SCIENCES

B.P. 812 Yaoundé
Tél: (237) 242 23 95 84
Fax: (237) 242 23 44 96



REPUBLIC OF CAMEROON
Peace - Work - Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I
FACULTY OF SCIENCE

P.O. BOX 812 Yaounde
Phone: (237) 242 23 95 84
Fax: (237) 242 23 44 96

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE ANIMALES

DEPARTMENT OF ANIMAL BIOLOGY AND PHYSIOLOGY

ATTESTATION DE CORRECTION

Nous soussignés, membres du jury de soutenance de la **Thèse de Doctorat/Ph.D en Biologie des Organismes Animaux**, Option : **Hydrobiologie et Environnement**, de Monsieur **POUNTOUGNIGNI Oumarou Farikou**, matricule **07Q836**, soutenance autorisée par la correspondance N° **24--3573/UYI/VR-EPDTIC/DAAC/DA-AAC/DRD/SR/SR-A/mna** du Recteur de l'Université de Yaoundé I en date du **12 décembre 2024** sur le sujet intitulé : « **Stygofaune des zones industrielles et non industrielles de la ville de Douala (Cameroun) : impact des quelques facteurs environnementaux** », attestons que les corrections exigées au candidat lors de cette évaluation, qui a eu lieu le **vendredi 17 janvier 2025** dans la salle **S01/S02** de la **Faculté des Sciences**, ont réellement été effectuées et que le présent document peut être déposé sous sa forme actuelle.

En foi de quoi, la présente attestation lui est délivrée pour servir et valoir ce que de droit.

Fait à Yaoundé, le **11.1 AVR 2025**

Les Examineurs

NURAH E.

Pr Sévilor KEKEUNOU



Le Chef de Département

Pr Sévilor KEKEUNOU
Faculté des Sciences
Université de Yaoundé I

Le Président du Jury

Nola Mboise
Professeur

UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I
UNIVERSITY OF YAOUNDE I



FACULTÉ DES SCIENCES
FACULTY OF SCIENCE

DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE ANIMALES
DEPARTMENT OF ANIMAL BIOLOGY AND PHYSIOLOGY

LABORATOIRE D'HYDROBIOLOGIE ET ENVIRONNEMENT
LABORATORY OF HYDROBIOLOGY AND ENVIRONMENT

Stygofaune en zones industrielles et non industrielles de la ville de Douala (Cameroun) : Impact de quelques facteurs environnementaux

THÈSE

Présentée et soutenue le 17 janvier 2025 en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat/PhD en Biologie des Organismes Animaux

Option : **Hydrobiologie et Environnement**

Par

POUNTOUGNIGNI Oumarou Farikou

Matricule 07Q836

Master ès-Sciences


Devant le jury composé de :

Président : **NOLA Moïse**, Professeur, Université de Yaoundé I ;

Rapporteurs : **ZEBAZE TOGOUET Serge Hubert**, Professeur, Université de Yaoundé I ;
NGASSAM Pierre, Professeur, Université de Yaoundé I ;

Membres : **AJEAGAH Gideon AGHAINDUM**, Professeur, Université de Yaoundé I ;
ONANA Fils Mamert, Maître de Conférences, Université de Douala ;
PISCART Christophe, Maître de Recherche, CNRS, Rennes ;
NOAH EWOTI Olive Vivien, Maître de Conférences, Université de Yaoundé I.

Année 2025

UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I Faculté des Sciences Division de la Programmation et du Suivi des Activités Académiques		UNIVERSITY OF YAOUNDE I Faculty of Science Division of Programming and Follow-up of Academic Affairs
LISTE DES ENSEIGNANTS PERMANENTS		LIST OF PERMANENT TEACHING STAFF

LISTE PROTOCOLAIRE DE LA FACULTE DES SCIENCES

ANNÉE ACADEMIQUE 2024/2025

(Par Département et par Grade)

DATE D'ACTUALISATION 30 septembre 2024

ADMINISTRATION

DOYEN : OWONO OWONO Luc Calvin, *Professeur*

VICE-DOYEN / DPSAA : NDJIGUI Paul-Désiré, *Professeur*

VICE-DOYEN / DSSE : NYEGUE Maximilienne Ascension, *Professeur*

VICE-DOYEN / DRC : NOUNDJEU Pierre, *Maître de Conférences*

Chef Division Administrative et Financière : NDOYE FOE Florentine Marie Chantal, *Maître de Conférences*

Chef Division des Affaires Académiques, de la Recherche et de la Scolarité DAARS : AJEAGAH Gideon AGHAINDUM, *Professeur*

1- DÉPARTEMENT DE BIOCHIMIE (BC) (44)

N°	NOMS ET PRÉNOMS	GRADE	OBSERVATIONS
1.	BIGOGA DAIGA Jude	Professeur	En poste
2.	FEKAM BOYOM Fabrice	Professeur	En poste
3.	KANSCI Germain	Professeur	En poste
4.	MBACHAM FON Wilfred	Professeur	En poste
5.	MOUNDIPA FEWOU Paul	Professeur	<i>Chef de Département</i>
6.	NGUEFACK Julienne	Professeur	En poste
7.	NJAYOU Frédéric Nico	Professeur	En poste
8.	OBEN Julius ENYONG	Professeur	En poste
9.	ACHU Merci BIH	Maître de Conférences	En poste

10.	AKINDEH MBUH NJI	Maître de Conférences	En poste
11.	ATOGHO Barbara MMA	Maître de Conférences	En poste
12.	AZANTSA KINGUE GABIN BORIS	Maître de Conférences	En poste
13.	BELINGA née NDOYE FOE F. M. C.	Maître de Conférences	<i>Chef DAF / FS</i>
14.	DAKOLE DABOY Charles	Maître de Conférences	En poste
15.	DONGMO LEKAGNE Joseph Blaise	Maître de Conférences	En poste
16.	DJUIDJE NGOUNOUE Marceline	Maître de Conférences	En poste
17.	DJUIKWO NKONGA Ruth Viviane	Maître de Conférences	En poste
18.	EFFA ONOMO Pierre	Maître de Conférences	<i>VD/FS/Univ Ebwa</i>
19.	EWANE Cécile Annie	Maître de Conférences	En poste
20.	KENGNE NOUEMSI Anne Pascale	Maître de Conférences	En poste
21.	KOTUE TAPTUE Charles	Maître de Conférences	En poste
22.	LUNGA Paul KEILAH	Maître de Conférences	En poste
23.	MANANGA Marlyse Joséphine	Maître de Conférences	En poste
24.	MBONG ANGIE M. Mary Anne	Maître de Conférences	En poste
25.	MOFOR née TEUGWA Clotilde	Maître de Conférences	<i>Doyen FS / UDs</i>
26.	NANA Louise épouse WAKAM	Maître de Conférences	En poste
27.	NGONDI Judith Laure	Maître de Conférences	En poste
28.	Palmer MASUMBE NETONGO	Maître de Conférences	En poste
29.	PECHANGOU NSANGOU Sylvain	Maître de Conférences	En poste
30.	TCHANA KOUATCHOUA Angèle	Maître de Conférences	En poste
31.	BEBEE Fadimatou	Chargée de Cours	En poste
32.	BEBOY EDJENGUELE Sara N.	Chargé de Cours	En poste
33.	FONKOUA Martin	Chargé de Cours	En poste
34.	FOUPOUAPOUOGNIGNI Yacouba	Chargé de Cours	En poste
35.	KOUOH ELOMBO Ferdinand	Chargé de Cours	En poste

36.	MBOUCHE FANMOE Marceline J.	Chargé de Cours	En poste
37.	OWONA AYISSI Vincent Brice	Chargé de Cours	En poste
38.	WILFRED ANGIE ABIA	Chargé de Cours	En poste
39.	BAKWO BASSOGOG Christian Bernard	Assistant	En Poste
40.	ELLA Fils Armand	Assistant	En Poste
41.	EYENGA Eliane Flore	Assistant	En Poste
42.	MADIESSE KEMGNE Eugenie Aimée	Assistant	En Poste
43.	MANJIA NJIKAM Jacqueline	Assistant	En Poste
44.	WOGUIA Alice Louise	Assistant	En Poste
2- DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE ANIMALES (BPA) (50)			
1.	AJEAGAH Gideon AGHAINDUM	Professeur	<i>DAARS/FS</i>
2.	DIMO Théophile	Professeur	En Poste
3.	DJIETO LORDON Champlain	Professeur	En Poste
4.	DZEUFJET DJOMENI Paul Désiré	Professeur	En Poste
5.	ESSOMBA née NTSAMA MBALA	Professeur	<i>CD et Vice Doyen/FMSB/UYI</i>
6.	KEKEUNOU Sévilor	Professeur	<i>Chef de Département</i>
7.	NJAMEN Dieudonné	Professeur	En poste
8.	NOLA Moïse	Professeur	En poste
9.	TAN Paul VERNYUY	Professeur	En poste
10.	TCHUEM TCHUENTE Louis Albert	Professeur	<i>Inspecteur de service / Coord.Progr./MINSANTE</i>
11.	ZEBAZE TOGOUET Serge Hubert	Professeur	En poste
12.	ALENE Désirée Chantal	Maître de Conférences	<i>Vice Doyen/ Uté Ebwa</i>
13.	ATSAMO Albert Donatien	Maître de Conférences	En poste

14.	BILANDA Danielle Claude	Maître de Conférences	En poste
15.	DJIOGUE Séfirin	Maître de Conférences	En poste
16.	GOUNOUE KAMKUMO Raceline épse FOTSING	Maître de Conférences	En poste
17.	JATSA BOUKENG Hermine épse MEGAPTCHE	Maître de Conférences	En Poste
18.	KANDEDA KAVAYE Antoine	Maître de Conférences	En poste
19.	LEKEUFACK FOLEFACK Guy B.	Maître de Conférences	En poste
20.	MAHOB Raymond Joseph	Maître de Conférences	En poste
21.	MBENOUN MASSE Paul Serge	Maître de Conférences	En poste
22.	MEGNEKOU Rosette	Maître de Conférences	En poste
23.	MOUNGANG Luciane Marlyse	Maître de Conférences	En poste
24.	NOAH EWOTI Olive Vivien	Maître de Conférences	En poste
25.	MONY Ruth épse NTONE	Maître de Conférences	En Poste
26.	MVEYO NDANKEU Yves Patrick	Maître de Conférences	En poste
27.	NGUEGUIM TSOFACK Florence	Maître de Conférences	En poste
28.	NGUEMBOCK	Maître de Conférences	En poste
29.	TAMSA ARFAO Antoine	Maître de Conférences	En poste
30.	TOMBI Jeannette	Maître de Conférences	En poste
31.	AMBADA NDZENGUE GEORGIA ELNA	Chargé de Cours	En poste
32.	BASSOCK BAYIHA Etienne Didier	Chargé de Cours	En poste
33.	ETEME ENAMA Serge	Chargé de Cours	En poste
34.	FEUGANG YOUMSSI François	Chargé de Cours	En poste
35.	KENGNE Alvine Christelle Epse FOKAM	Chargé de Cours	En poste
36.	FOSSI TANKOUA Olivia Epse DJEUTCHOUANG SAYANG	Chargé de Cours	En poste (transfert Uté de Dla)

37.	GONWOUO NONO Legrand	Chargé de Cours	En poste
38.	KOGA MANG DOBARA	Chargé de Cours	En poste
39.	LEME BANOCK Lucie	Chargé de Cours	En poste
40.	MAPON NSANGOU Indou	Chargé de Cours	En poste
41.	METCHI DONFACK MIREILLE FLAURE EPSE GHOUMO	Chargé de Cours	En poste
42.	NGOUATEU KENFACK Omer Bébé	Chargé de Cours	En poste
43.	NJUA Clarisse YAFI	Chargée de Cours	<i>Chef Div. Uté Bamenda</i>
44.	NWANE Philippe Bienvenu	Chargé de Cours	En poste
45.	TADU Zephyrin	Chargé de Cours	En poste
46.	YEDE	Chargé de Cours	En poste
47.	YOUNOUSSA LAME	Chargé de Cours	En poste
48.	KODJOM WANCHE Jacguy Joyce	Assistante	En poste
49.	NDENGUE Jean De Matha	Assistant	En poste
50.	ZEMO GAMO Franklin	Assistant	En poste

3- DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE VÉGÉTALES (BPV) (32)

1.	AMBANG Zachée	Professeur	<i>Chef de Département</i>
2.	DJOCGOUE Pierre François	Professeur	En poste
3.	MBOLO Marie	Professeur	En poste
4.	MOSSEBO Dominique Claude	Professeur	En poste
5.	NDONGO BEKOLO	Professeur	En poste
6.	ZAPFACK Louis	Professeur	En poste
7.	ANGONI Hyacinthe	Maître de Conférences	En poste
8.	BIYE Elvire Hortense	Maître de Conférences	En poste
9.	MAHBOU SOMO TOUKAM. Gabriel	Maître de Conférences	En poste
10.	MALA Armand William	Maître de Conférences	En poste

11.	MBARGA BINDZI Marie Alain	Maître de Conférences	<i>DAAC /UDla</i>
12.	NGALLE Hermine BILLE	Maître de Conférences	En poste
13.	NGONKEU MAGAPTCHE Eddy L.	Maître de Conférences	<i>CT / MINRESI</i>
14.	TONFACK Libert Brice	Maître de Conférences	En poste
15.	TSOATA Esaïe	Maître de Conférences	En poste
16.	ONANA JEAN MICHEL	Maître de Conférences	En poste
17.	DJEUANI Astride Carole	Chargé de Cours	En poste
18.	GONMADGE CHRISTELLE	Chargé de Cours	En poste
19.	MAFFO MAFFO Nicole Liliane	Chargé de Cours	En poste
20.	MANGA NDJAGA JUDE	Chargé de Cours	En poste
21.	NNANGA MEBENGA Ruth Laure	Chargé de Cours	En poste
22.	NOUKEU KOUAKAM Armelle	Chargé de Cours	En poste
23.	NSOM ZAMBO EPSE PIAL ANNIE CLAUDE	Chargé de Cours	<i>En détachement /UNESCO MALI</i>
24.	GODSWILL NTSOMBOH NTSEFONG	Chargé de Cours	En poste
25.	KABELONG BANAHOU Louis-Paul- Roger	Chargé de Cours	En poste
26.	KONO Léon Dieudonné	Chargé de Cours	En poste
27.	LIBALAH Moses BAKONCK	Chargé de Cours	En poste
28.	LIKENG-LI-NGUE Benoit C	Chargé de Cours	En poste
29.	TAEDOUNG Evariste Hermann	Chargé de Cours	En poste
30.	TEMEGNE NONO Carine	Chargé de Cours	En poste
31.	DIDA LONTSI Sylvere Landry	Assistant	En poste
32.	METSEBING Blondo-Pascal	Assistant	En poste

4- DÉPARTEMENT DE CHIMIE INORGANIQUE (CI) (27)

1.	GHOGOMU Paul MINGO	Professeur	<i>Ministre Chargé de Mission PR</i>
2.	NANSEU NJIKI Charles Péguy	Professeur	En poste
3.	NDIFON Peter TEKE	Professeur	<i>CT MINRESI</i>
4.	NENWA Justin	Professeur	En poste
5.	NGOMO Horace MANGA	Professeur	<i>Vice Chancellor/UB</i>
6.	NJIOMOU C. épse DJANGANG	Professeur	En poste
7.	NJOYA Dayirou	Professeur	En poste
8.	ACAYANKA Elie	Maître de Conférences	En poste
9.	EMADAK Alphonse	Maître de Conférences	En poste
10.	KAMGANG YOUBI Georges	Maître de Conférences	En poste
11.	KEMMEGNE MBOUGUEM Jean C.	Maître de Conférences	En poste
12.	KENNE DEDZO GUSTAVE	Maître de Conférences	En poste
13.	MBEY Jean Aime	Maître de Conférences	En poste
14.	NDI NSAMI Julius	Maître de Conférences	<i>Chef de Département</i>
15.	NEBAH Née NDOSIRI Bridget NDOYE	Maître de Conférences	<i>Sénatrice/SENAT</i>
16.	NYAMEN Linda Dyorisse	Maître de Conférences	En poste
17.	PABOUDAM GBAMBIE AWAWOU	Maître de Conférences	En poste
18.	TCHAKOUTE KOUAMO Hervé	Maître de Conférences	En poste
19.	BELIBI BELIBI Placide Désiré	Maître de Conférences	<i>Chef Service/ ENS Bertoua</i>
20.	CHEUMANI YONA Arnaud M.	Maître de Conférences	En poste
21.	KOUOTOU DAOUDA	Maître de Conférences	En poste
22.	MAKON Thomas Beauregard	Chargé de Cours	En poste
23.	NCHIMI NONO KATIA	Chargée de Cours	En poste
24.	NJANKWA NJABONG N. Eric	Chargé de Cours	En poste
25.	PATOUOSSA ISSOFA	Chargé de Cours	En poste

26.	SIEWE Jean Mermoz	Chargé de Cours	En Poste
27.	BOYOM TATCHEMO Franck W.	Assistant	En Poste
6- DÉPARTEMENT DE CHIMIE ORGANIQUE (CO) (33)			
1.	Alex de Théodore ATCHADE	Professeur	<i>DEPE/Univ. Bertoua</i>
2.	DONGO Etienne	Professeur	<i>Vice-Doyen/FSE/UIYI</i>
3.	NGOUELA Silvère Augustin	Professeur	<i>Chef de Département UDS</i>
4.	PEGNYEMB Dieudonné Emmanuel	Professeur	<i>Recteur UBertoua/ Chef de Département</i>
5.	MBAZOA née DJAMA Céline	Professeur	En poste
6.	MKOUNGA Pierre	Professeur	En poste
7.	AMBASSA Pantaléon	Maître de Conférences	En poste
8.	EYONG Kenneth OBEN	Maître de Conférences	En poste
9.	FOTSO WABO Ghislain	Maître de Conférences	En poste
10.	KAMTO Eutrophe Le Doux	Maître de Conférences	En poste
11.	KENMOGNE Marguerite	Maître de Conférences	En poste
12.	MVOT AKAK CARINE	Maître de Conférences	En poste
13.	NGO MBING Joséphine	Maître de Conférences	<i>Chef de Cellule MINRESI</i>
14.	NGONO BIKOBO Dominique Serge	Maître de Conférences	<i>C.E.A/ MINESUP</i>
15.	NOTE LOUGBOT Olivier Placide	Maître de Conférences	<i>Dir ENS/Uté Bertoua</i>
16.	NOUNGOUE TCHAMO Diderot	Maître de Conférences	En poste
17.	TABOPDA KUATE Turibio	Maître de Conférences	En poste
18.	TAGATSING FOTSING Maurice	Maître de Conférences	En poste
19.	OUAHOUE WACHE Blandine M.	Maître de Conférences	En poste
20.	ZONDEGOUMBA Ernestine	Maître de Conférences	En poste
21.	MESSI Angélique Nicolas	Chargé de Cours	En poste
22.	MUNVERA MFIFEN Aristide	Chargé de Cours	En poste

23.	NGNINTEDO Dominique	Chargé de Cours	En poste
24.	NGOMO Orléans	Chargée de Cours	En poste
25.	NONO NONO Éric Carly	Chargé de Cours	En poste
26.	OUETE NANTCHOUANG Judith Laure	Chargée de Cours	En poste
27.	SIELINOU TEDJON Valérie	Chargé de Cours	En poste
28.	TCHAMGOUE Joseph	Chargé de Cours	En poste
29.	TSAFFACK Maurice	Chargé de Cours	En poste
30.	TSAMO TONTSA Armelle	Chargé de Cours	En poste
31.	TSEMEUGNE Joseph	Chargé de Cours	En poste
32.	NDOGO ETEME Olivier	Assistant	En poste
33.	NGUEMDJO CHIMEZE Valery Wilfried	Assistant	En poste
6- DEPARTEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES (ER) (1)			
1.	BODO Bertrand	Professeur	<i>Chef de Département</i>
7- DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE (IN) (22)			
1.	ATSA ETOUNDI Roger	Professeur	<i>Chef de Division des SI/ MINESUP</i>
2.	FOUDA NDJODO Marcel Laurent	Professeur	<i>Inspecteur Général Académique/ MINESUP</i>
3.	NDOUNDAM René	Maître de Conférences	En poste
4.	TSOPZE Norbert	Maître de Conférences	En poste
5.	ABESSOLO ALO'O Gislain	Chargé de Cours	<i>Chef de Cellule MINFOPRA</i>
6.	AMINOU HALIDOU	Chargé de Cours	<i>Chef de Département</i>
7.	DJAM Xaviera YOUH - KIMBI	Chargé de Cours	En Poste
8.	DOMGA KOMGUEM Rodrigue	Chargé de Cours	En poste
9.	EBELE Serge Alain	Chargé de Cours	En poste

10.	EKODECK Stéphane Gaël Raymond	Chargé de Cours	En poste
11.	HAMZA Adamou	Chargé de Cours	En poste
12.	JIOMEKONG AZANZI Fidel	Chargé de Cours	En poste
13.	KOUOKAM KOUOKAM E. A.	Chargé de Cours	En poste
14.	MELATAGIA YONTA Paulin	Chargé de Cours	En poste
15.	MESSI NGUELE Thomas	Chargé de Cours	En poste
16.	MONTHÉ DJIADEU Valéry M.	Chargé de Cours	En poste
17.	NZEKON NZEKO'O ARMEL JACQUES	Chargé de Cours	En poste
18.	OLLE OLLE Daniel Claude Georges Delort	Chargé de Cours	<i>Directeur Adjoint ENSET Ebolowa</i>
19.	TAPAMO Hyppolite	Chargé de Cours	En poste
20.	BAYEM Jacques Narcisse	Assistant	En poste
21.	MAKEMBE. S. Oswald	Assistant	<i>Directeur CUTI</i>
22.	NKONDOCK. MI. BAHANACK.N.	Assistant	En poste

8- DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES (MA) (34)

1.	AYISSI Raoult Domingo	Professeur	<i>Chef de Département</i>
2.	KIANPI Maurice	Maître de Conférences	En poste
3.	MBANG Joseph	Maître de Conférences	En poste
4.	MBEHOU Mohamed	Maître de Conférences	<i>Chef de Division/ENSPY</i>
5.	MBELE BIDIMA Martin Ledoux	Maître de Conférences	<i>Chef de Département de modélisation et applications industrielles/ENSPY</i>
6.	NOUNDJEU Pierre	Maître de Conférences	<i>VDRC/FS/UYYI</i>
7.	TAKAM SOH Patrice	Maître de Conférences	En poste
8.	TCHAPNDA NJABO Sophonie B.	Maître de Conférences	<i>Directeur/AIMS Rwanda</i>
9.	TCHOUNDJA Edgar Landry	Maître de Conférences	En poste
10.	AGHOUKENG JIOFACK Jean Gérard	Chargé de Cours	<i>Chef Cellule MINEPAT</i>

11.	BOGSO ANTOINE Marie	Chargé de Cours	En poste
12.	BITYE MVONDO Esther Claudine	Chargé de Cours	En poste
13.	CHENDJOU Gilbert	Chargé de Cours	En poste
14.	DJIADEU NGAHA Michel	Chargé de Cours	En poste
15.	DOUANLA YONTA Herman	Chargé de Cours	En poste
16.	KIKI Maxime Armand	Chargé de Cours	En poste
17.	KOKOMO AYISSI Eric Brice	Chargé de Cours	En poste (transfert de l'université de Douala)
18.	LOUMNGAM KAMGA Victor	Chargé de Cours	En poste
19.	MBAKOP Guy Merlin	Chargé de Cours	En poste
20.	MBATAKOU Salomon Joseph	Chargé de Cours	En poste
21.	MENGUE MENGUE David Joël	Chargé de Cours	<i>Chef Dpt /ENS Université d'Ebolowa</i>
22.	MBIAKOP Hilaire George	Chargé de Cours	En poste
23.	NGUEFACK Bernard	Chargé de Cours	En poste
24.	NIMPA PEFOUKEU Romain	Chargée de Cours	En poste
25.	OGADOA AMASSAYOGA	Chargée de Cours	En poste
26.	POLA DOUNDOU Emmanuel	Chargé de Cours	<i>En stage</i>
27.	TENKEU JEUFACK Yannick Léa	Chargé de Cours	En poste
28.	TCHEUTIA Daniel Duviol	Chargé de Cours	En poste
29.	TETSADJIO TCHILEPECK M. Eric.	Chargé de Cours	En poste
30.	FOKAM Jean Marcel	Assistant	En poste
31.	GUIDZAVAI KOUCHERE Albert	Assistant	En poste
32.	MANN MANYOMBE Martin Luther	Assistant	En poste
33.	MEFENZA NOUNTU Thiery	Assistant	En poste
34.	NYOUMBI DLEUNA Christelle	Assistant	En poste

9- DÉPARTEMENT DE MICROBIOLOGIE (MIB) (24)

1.	ESSIA NGANG Jean Justin	Professeur	<i>Chef de Département</i>
2.	NYEGUE Maximilienne Ascension	Professeur	<i>VICE-DOYEN / DSSE</i>
3.	SADO KAMDEM Sylvain Leroy	Professeur	En poste
4.	ASSAM ASSAM Jean Paul	Maître de Conférences	En poste
5.	BOUGNOM Blaise Pascal	Maître de Conférences	En poste
6.	BOYOMO ONANA	Maître de Conférences	En poste
7.	KOUTTCHEU MABEKU Epse KOUAM Laure Brigitte	Maître de Conférences	En poste
8.	RIWOM Sara Honorine	Maître de Conférences	En poste
9.	NJIKI BIKOÏ Jacky	Maître de Conférences	En poste
10.	TCHIKOUA Roger	Maître de Conférences	<i>Chef de Service de la Scolarité</i>
11.	ESSONO Damien Marie	Chargé de Cours	En poste
12.	LAMYE Glory MOH	Chargé de Cours	En poste
13.	MEYIN A EBONG Solange	Chargé de Cours	En poste
14.	MONI NDEDI Esther Del Florence	Chargé de Cours	En poste
15.	NKOUDOU ZE Nardis	Chargé de Cours	En poste
16.	NKOUÉ TONG Abraham	Chargé de Cours	En poste
17.	TAMATCHO KWEYANG Blandine Pulchérie	Chargé de Cours	En poste
18.	SAKE NGANE Carole Stéphanie	Chargé de Cours	En poste
19.	TOBOLBAÏ Richard	Chargé de Cours	En poste
20.	EZO'O MENGO Fabrice Télésfor	Assistant	En poste
21.	EHETH Jean Samuel	Assistant	En poste
22.	MAYI Marie Paule Audrey	Assistant	En poste
23.	NGOUEENAM Romial Joël	Assistant	En poste

24.	NJAPNDOUNKE Bilkissou	Assistant	En poste
10. DEPARTEMENT DE PHYSIQUE(PHY) (42)			
1.	BEN- BOLIE Germain Hubert	Professeur	En poste
2.	BIYA MOTTO Frédéric	Professeur	<i>DG/HYDRO Mekin</i>
3.	DJUIDJE KENMOE épouse ALOYEM	Professeur	En poste
4.	EKOBENA FOU DA Henri Paul	Professeur	<i>Vice-Recteur. Uté Ngaoundéré</i>
5.	ESSIMBI ZOBO Bernard	Professeur	En poste
6.	EYEBE FOU DA Jean sire	Professeur	En poste
7.	HONA Jacques	Professeur	En poste
8.	NANA ENGO Serge Guy	Professeur	En poste
9.	NANA NBENDJO Blaise	Professeur	En poste
10.	NDJAKA Jean Marie Bienvenu	Professeur	<i>Chef de Département</i>
11.	NJANDJOCK NOUCK Philippe	Professeur	En poste
12.	SAIDOU	Professeur	<i>Chef de centre/IRGM/MINRESI</i>
13.	SIMO Elie	Professeur	En poste
14.	TABOD Charles TABOD	Professeur	<i>Doyen FSUniv/Bda</i>
15.	TCHAWOUA Clément	Professeur	En poste
16.	WOAFO Paul	Professeur	En poste
17.	ZEKENG Serge Sylvain	Professeur	En poste
18.	ENYEGUE A NYAM épse BELINGA	Maître de Conférences	<i>Chef de Division de la formation continue et à distance/ENSPY</i>
19.	FEWO Serge Ibraïd	Maître de Conférences	En poste
20.	FOUEJIO David	Maître de Conférences	<i>Chef Cell/ MINADER</i>
21.	MBINACK Clément	Maître de Conférences	En poste
22.	MBONO SAMBA Yves Christian U.	Maître de Conférences	En poste

23.	MELI'I Joelle Larissa	Maître de Conférences	En poste
24.	MVOGO ALAIN	Maître de Conférences	En poste
25.	NDOP Joseph	Maître de Conférences	En poste
26.	SIEWE SIEWE Martin	Maître de Conférences	En poste
27.	VONDOU Derbetini Appolinaire	Maître de Conférences	En poste
28.	WAKATA née BEYA Annie Sylvie	Maître de Conférences	<i>Directeur/ENS/UJI</i>
29.	WOULACHE Rosalie Laure	Maître de Conférences	<i>En stage depuis février 2023</i>
30.	ABDOURAHIMI	Chargé de Cours	En poste
31.	AYISSI EYEBE Guy François Valérie	Chargé de Cours	En poste
32.	CHAMANI Roméo	Chargé de Cours	En poste
33.	DJIOTANG TCHOTCHOU Lucie Angennes	Chargée de Cours	En poste
34.	EDONGUE HERVAIS	Chargé de Cours	En poste
35.	KAMENI NEMATCHOUA Modeste	Chargé de Cours	En poste
36.	LAMARA Maurice	Chargé de Cours	En poste
37.	NGA ONGODO Dieudonné	Chargé de Cours	En poste
38.	OTTOU ABE Martin Thierry	Chargé de Cours	<i>Directeur Unité de production des réactifs/IMPM</i>
39.	TEYOU NGOUPO Ariel	Chargé de Cours	En poste
40.	TOGUEU MOTCHEYO Alain Bertrand	Chargé de Cours	En poste
41.	WANDJI NYAMSI William	Chargé de Cours	En poste
42.	SOUFFO TAGUEU Merimé	Assistant	En poste
11- DÉPARTEMENT DE SCIENCES DE LA TERRE (ST) (33)			
1.	EKOMANE Emile	Professeur	<i>Chef Div./Uté Ebolowa</i>
2.	GANNO Sylvestre	Professeur	En poste
3.	NDJIGUI Paul-Désiré	Professeur	<i>Chef de Département</i>

4.	NGOS III Simon	Professeur	En poste
5.	NKOUMBOU Charles	Professeur	En poste
6.	ONANA Vincent Laurent	Professeur	<i>Chef de Département/Uté. Eb.</i>
7.	YENE ATANGANA Joseph Q.	Professeur	<i>Chef Div. /MINTP</i>
8.	BISSO Dieudonné	Maître de Conférences	En poste
9.	Elisé SABABA	Maitre de Conférences	En poste
10.	EYONG John TAKEM	Maître de Conférences	En poste
11.	FUH Calistus Gentry	Maître de Conférences	<i>Sec. D'Etat/MINMIDT(ai)</i>
12.	MBIDA YEM	Maitre de Conférences	En poste
13.	MBESSE Cécile Olive	Maitre de Conférences	En poste
14.	METANG Victor	Maître de Conférences	En poste
15.	NGO BIDJECK Louise Marie	Maître de Conférences	En poste
16.	NGUEUTCHOUA Gabriel	Maître de Conférences	<i>CEA/MINRESI</i>
17.	NJILAH Isaac KONFOR	Maître de Conférences	En poste
18.	TCHAKOUNTE Jacqueline épouse NUMBEM	Maître de Conférences	<i>Chef. Cell /MINRESI</i>
19.	TCHOUANKOUE Jean-Pierre	Maître de Conférences	En poste
20.	TEMGA Jean Pierre	Maître de Conférences	En poste
21.	ZO'O ZAME Philémon	Maître de Conférences	<i>DG/ART</i>
22.	ANABA ONANA Achille Basile	Chargé de Cours	En poste
23.	BEKOA Etienne	Chargé de Cours	En poste
24.	MAMDEM TAMTO Lionelle Estelle, épouse BITOM	Chargée de Cours	En poste
25.	NGO BELNOUN Rose Noël	Chargée de Cours	En poste
26.	NGO'O ZE ARNAUD	Chargé de Cours	En poste
27.	NOMO NEGUE Emmanuel	Chargé de Cours	En poste
28.	NTSAMA ATANGANA Jacqueline	Chargée de Cours	En poste

29.	TCHAPTCHET TCHATO De P.	Chargé de Cours	En poste
30.	TEHNA Nathanaël	Chargé de Cours	En poste
31.	FEUMBA Roger	Chargé de Cours	En poste
32.	MBANGA NYOBE Jules	Chargé de Cours	En poste
33.	KOAH NA LEBOGO Serge P.	Assistant	En poste
34.	TENE DJOUKAM Joëlle Flore, épouse KOUANKAP NONO	Assistante	En poste

Répartition chiffrée des Enseignants de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I

NOMBRE D'ENSEIGNANTS					
DÉPARTEMENT	Professeurs	Maîtres de Conférences	Chargés de Cours	Assistants	Total
BCH	8 (01)	20 (12)	9 (04)	6 (05)	44 (20)
BPA	11 (01)	19 (09)	16 (05)	3 (02)	49 (16)
BPV	6 (01)	10 (02)	14 (08)	2 (00)	32 (10)
CI	7 (01)	14 (04)	5 (01)	1 (00)	27 (05)
CO	7 (01)	15 (05)	11 (05)	1 (00)	33 (09)
ER	1 (00)		/	/	01 (0)
IN	2 (00)	2 (00)	14 (01)	4 (00)	22 (01)
MAT	1 (00)	8 (00)	19 (02)	5 (01)	34 (02)
MIB	3 (01)	7 (03)	9 (05)	5 (02)	24 (11)
PHY	18 (01)	12 (04)	11 (01)	1 (00)	42 (06)
ST	10 (00)	17 (03)	13 (03)	3 (01)	34 (07)
Total	74 (07)	124 (42)	121 (35)	31 (11)	342 (87)

Soit un total de **342 (87)** dont :

- Professeurs **69 (07)**
- Maîtres de Conférences **123 (41)**
- Chargés de Cours **120 (30)**
- Assistants **30 (09)**

() = Nombre de Femmes **87**

DEDICACE

À

Mes parents,

NDAMBA Ramatou

Et

NJUTAPMVOUI Mama

REMERCIEMENTS

Je rends Grâce à **Allah** Tout Puissant, le Très miséricordieux qui m'a guidé et m'a donné les ressources spirituelles, morales, physiques et financières pour mener à bien ce travail.

Les travaux présentés dans cette thèse ont été réalisés d'une part, au sein du Laboratoire d'Hydrobiologie et Environnement de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I et, d'autre part, au Laboratoire d'Ecosystème, Biodiversité et Evolution (ECOBIO) de l'Université de Rennes I (France). A l'issue de ce travail, je tiens très sincèrement à exprimer ma gratitude à tous ceux dont les encouragements, les conseils et les critiques m'ont servi de pilier dans le cadre de cette thèse.

Je dis tout d'abord un grand merci au Professeur **ZÉBAZÉ TOGOUET Serge Hubert**, mon Directeur de thèse. Son dévouement au travail, sa rigueur scientifique, sa simplicité et son instinct paternel ont été pour moi des sources de motivation pour effectuer un travail rigoureux. Merci Professeur pour l'intérêt et la confiance que vous m'avez témoignés durant toutes ces années. J'éprouve à votre égard, un sentiment de profonde estime et d'infinie gratitude.

Je suis infiniment reconnaissant envers le Professeur **NGASSAM Pierre** qui, malgré ses multiples occupations, a accepté de codiriger ce travail. Ses conseils, ses enseignements, sa rigueur méthodique et ses critiques constructives ont permis d'améliorer significativement la qualité de ce manuscrit.

Qu'il me soit permis de remercier par anticipation tous les éminents membres du jury qui me font le grand honneur de juger ce travail et qui ont accepté d'y consacrer une part de leur précieux temps pour apporter leurs observations.

J'exprime toute ma reconnaissance et ma gratitude à l'endroit de tous les enseignants du Département de Biologie et Physiologie Animales de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I pour la formation reçue, les encouragements et les conseils prodigués lors de la mise en œuvre de ce travail. Il s'agit particulièrement du feu Professeur **BILONG BILONG Charles Félix**, des Professeurs **AJEAGAH Gideon AGHAINDUM**, **DJIETO Lordon Champlain**, **FOMENA Abraham**, **KEKEUNOU Sévilor**, **NOLA Moïse**, **MEGNEKOU Rosette**, **NOAH EWOTI Vivien Olive**, **MOUNGANG Luciane MARLYSE** et **TAMSA ARFAO Antoine**.

Je voudrais adresser mon infinie reconnaissance au Docteur **Christophe PISCART**, de l'UMR CNRS 6553- ECOBIO de l'Université de Rennes 1 dont la grande générosité et surtout la rigueur scientifique ont significativement contribué à la réalisation de ce travail. Ses enseignements dans l'identification morphologique et biomoléculaire des stygobiontes récoltés

ont été riches et rigoureux. Mes remerciements vont également à l'endroit de son épouse **Solange PISCART** et de leur fille **Léa PISCART** pour l'ambiance familiale qu'elles ont créée autour de moi durant mon séjour à Rennes (France).

Je tiens également à remercier le Professeur **NYAMSI TCHATCHO Nectaire**, les Docteurs **TUEKAM KAYO Raoul P.**, **TCHAKONTE Siméon** et **CHINCHE Sylvie BELENGFE** pour m'avoir transmis des éléments scientifiques essentiels à la réalisation de cette thèse.

Les sorties de terrain n'étant pas aisées, ce travail est le fruit d'une équipe dévouée et dynamique. Ce travail d'équipe s'est fait avec la collaboration des Docteurs **KAPSO Mireille** et **MOANONO Patrick Georges Thiery** et de messieurs **SOB NANGOU Paul Bertrand** et **NSANGOU Issah**. A mes collègues de laboratoire **OWONA EDOA François Désiré**, **TAYOU Blandine**, **NANFACK DONGMO Rodrigue**, **KOUEDEM KUEPPO Eric**, **ZAMBO Gabriel**, les docteurs **TSOMENE Pierre**, **FOTSEU KOUAM Arnold**, **NWAHA Mathias** et **BOUDEM TSANE Cécile Rita**, à qui je tiens à témoigner tout particulièrement ma sympathie et ma reconnaissance. Je remercie également et très particulièrement Madame **Christelle SOB** et son époux pour le véhicule mis à notre disposition et surtout pour des nombreux repas concoctés chaque fois à l'endroit de l'équipe de travail.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les chercheurs, étudiants et employés de la Station Biologique de Paimpont (Rennes, France) pour leurs encouragements, soutiens et pour l'ambiance conviviale créée autour de moi durant mon stage. Il s'agit de **VALET Dominique**, **CLUZEAU Daniel**, **HOEFFNER Kévine**, **LEVEQUE Nathan**, **DIALLO Abdourahmane** et très particulièrement **DERDER Adam**.

Le renforcement des capacités des Doctorants à travers des formations continues (MATHINBIO) m'a permis non seulement d'actualiser et d'approfondir mes connaissances, utiles pour les programmes de recherches à travers les collèges doctoraux. C'est dans ce cadre que nous avons effectué un stage du 12 mai au 13 septembre 2021 à Rennes en France. A cet effet, nous ne saurions continuer sans toutefois remercier l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF), la Directrice AUF Afrique Centrale et Grands Lacs, Madame **SY-WONYU Aïssatou** et le coordonnateur des programmes, le Professeur **DJOCGOUE François**. Nous remercions également le Service de Coopération et d'Action Culturelle (SCAC) de l'Ambassade de France au Cameroun, pour le financement de ce stage.

Je remercie également tous les habitants des quartiers de la ville de Douala où j'ai effectué la prospection et particulièrement les propriétaires des puits étudiés pour leur accueil et leur compréhension.

Il m'est très agréable d'exprimer ma reconnaissance à ma fiancée **NOUBISSIE NGAPEBOUA Thérèse Flore** pour son amour, son attention, sa patience, sa compréhension, son assistance et son amitié. Qu'elle reçoive ici mes vifs et chaleureux remerciements. Je dis également un grand merci à mes enfants **POUNTOUGNIGNI NGAPAGNA Amine Rayan**, **POUNTOUGNIGNI AKEGNI Nabila Emna**, **POUNTOUGNIGNI WAM Ilyan Riad** et **POUNTOUGNIGNI Mohamed Fauzan** qui ont souffert du manque de mon affection pendant la réalisation de ce travail.

Je remercie mes amis : **NJIKAM MANOUTPOUN Issoufa**, **LIETBOUO Alain Georges** et surtout **POUACHIYOUEN Edouard Aimé** pour leur compréhension, leur assistance et leurs soutiens multiformes.

Mes remerciements vont également à l'endroit des familles **NGAPEBOUA**, **WANTOU SIANTOU**, **ASSAM MVONDO**, **VAN DE GUCHTE** à Yaoundé et **PECHANGO** à Mapou-Njipoute pour leurs soutiens, conseils et encouragements.

Je tiens également à remercier tous les membres de l'Amicale du Personnel de l'Institut Siantou Secondaire (APIS) et ceux de l'Association KPNY et KÖNE pour leurs encouragements et pour l'ambiance familiale qui règne entre nous.

Je remercie toute ma famille notamment: mes sœurs **PEZIEYA Raînetou**, **NGOUTANE Adija** et **TAPEWOU Remletou**, mes frères **NDIAMOUN Zounedou**, **MOUNCHEROU Aboubakar** et **MOULOUOM Samirou**, mes oncles **NGAPNA Chouaïbou**, **MOULOUOM Ahmadou** et mon neveu **MFESSAH Mohamed**. Je voudrais ici leur témoigner toute mon affection et toute ma reconnaissance pour cette chaleureuse atmosphère familiale qu'ils ont toujours su entretenir autour de moi.

Je remercie enfin toutes les personnes qui m'ont accompagné, supporté ou encouragé tout au long de ce travail.

SOMMAIRE

LISTE PROTOCOLAIRE DE LA FACULTE DES SCIENCES	i
DEDICACE	xvii
REMERCIEMENTS	xviii
SOMMAIRE	xxi
LISTE DES ABREVIATIONS ET DES ACRONYMES	xxiii
LISTE DES FIGURES	xxv
LISTE DES TABLEAUX	xxviii
RESUME	xxx
ABSTRACT	xxxii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I :REVUE DE LA LITTERATURE	5
I.1. Généralités sur les eaux souterraines	6
I.1.1. Définition et origine des eaux souterraines	6
I.1.2. Différents types de milieux souterrains	6
I.2. Emergence des eaux souterraines	7
I.2.1. Sources.....	8
I.2.2. Puits	8
I.2.3. Forages.....	8
I.3. Caractéristiques des milieux aquatiques souterrains	9
I.3.1. Obscurité.....	9
I.3.2. Variabilité des paramètres abiotiques	9
I.3.3. Physicochimie des eaux souterraines	10
I.4. Importance des milieux aquatiques souterrains	17
I.4.1. Réservoir d'eau.....	17
I.4.2. Réservoir de biodiversité	18
I.5. Communautés biologiques en milieu aquatique souterrain et leurs adaptations.....	18
I.5.1. Classification des communautés biologiques aquatiques souterraines.....	19
I.5.2. Biodiversité aquatique souterraine	20
I.5.3. Adaptation des organismes au milieu aquatique souterrain	24

I.5.4. Rôle de la faune aquatique souterraine	25
I.6. Pollution des eaux souterraines	26
CHAPITRE II : ZONE D'ETUDE, MATERIEL ET METHODES	30
II.1. Zone d'étude	31
II.1.1. Description générale.....	31
II.1.2. Choix et description des sites d'étude	33
II.2. Matériel et méthodes.....	46
II.2.1. Mesure des paramètres hydromorphométriques et géographiques des stations	46
II.2.2. Mesure des paramètres physicochimiques	47
II.2.3. Techniques d'étude de la faune aquatique souterraine.....	50
II.2.4. Traitement des données abiotiques et biotiques	53
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION	58
III.1. Résultats.....	59
III.1.1. Physicochimie des eaux souterraines de Douala	59
III.1.2. Faune aquatique souterraine de la ville de Douala	84
III.1.3. Relation entre les paramètres abiotiques de l'eau et la stygofaune	122
III.2. Discussion.....	127
III.2.1. Physicochimie des eaux souterraines de la ville de Douala.....	127
III.2.2. Faune aquatique souterraine de Douala	132
III.2.3. Influence des paramètres environnementaux sur la distribution de la stygofaune	137
CONCLUSION, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES	139
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	143
ANNEXES.....	164

LISTE DES ABREVIATIONS ET DES ACRONYMES

ABGD: Automatic Barcode Gap Discovery

ALUBASSA : Aluminium de Bassa

ASAP: Assemble Species by Automatic Partitioning

CAMLAIT : Société Camerounaise de fabrication des produits laitiers

CAMOA : Société Camerounaise d'Oxygène et d'Acétylène

CCC : Complexe Chimique Camerounais

CCIC : Complexe Chimique Industriel du Cameroun

CEP : Compagnie Equatoriale de Peintures

CHOCOCAM : Chocolaterie et Confiserie du Cameroun

CIB : Centre Industriel de Bassa

CICAM : Cotonnière Industrielle du Cameroun

CIL : Complexe Industriel du Littoral

CMC : Complexe Métallurgique du Cameroun

CTE : Cameroon Tea Estates

CUD : Communauté Urbaine de Douala

COI : Cytochrome Oxydase I

dbRDA : Distance-based redundancy analysis (Analyse de redondance basée sur la distance)

DistLM : Distance based linear models (Modélisation Linéaire basée sur la distance)

GMYC : Generalized Mixed Yule Coalescent

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

HYSACAM : Hygiène et Salubrité du Cameroun

NTU : Formasine Turbidity Units

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PK : Point Kilométrique

PILCAM : Société Camerounaise de Fabrication de Piles Electriques

PLASTICAM : Plastique du Cameroun

RNA : Réseau de Neurones Artificiels

SABC : Société Anonyme des Brasseries du Cameroun

SCIMPOS : Société Camerounaise d'Importation des Mousses et Polystyrène Souple

SCTB : Société Camerounaise de Transformation du Blé

SIC : Société Immobilière du Cameroun

SIC CACAOS : Société Industrielle Camerounaise du Cacao, du Café, du Thé et du Sucre

SIPCA : Société Industrielle des Produits Chimiques et Aromatiques

SOCARTO : Société Camerounaise de Cartonnage et de fournitures de bureau

SOCAVER : Société Camerounaise de Verrerie

SOM : Self-Organizing Maps

UCB : Union Camerounaise des Brasseries

UCPHARM : Unité Camerounaise Pharmaceutique

UNALOR : Union Allumettièrre Equatoriale

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Classification écologique des invertébrés souterrains aquatiques	19
Figure 2 : Classification des différents invertébrés souterrains.	20
Figure 3 : Mécanismes de contamination des eaux souterraines	27
Figure 4 : Quelques vues sur la pollution industrielle des eaux dans la ville de Douala..	29
Figure 5 : Diagramme ombrothermique présentant les variations mensuelles des valeurs	32
Figure 6 : Localisation des différents sites d'étude.....	34
Figure 7 : Localisation des stations d'échantillonnage de la zone périurbaine de PK 21	35
Figure 8 : Images des puits de la zone périurbaine de PK21	37
Figure 9 : Images des puits du site de Ndogbong.....	38
Figure 10 : Images des puits du site de Cité SIC.....	39
Figure 11 : Localisation des stations d'échantillonnage des sites de Ndogbong et de Cité SIC	39
Figure 12 : Localisation des stations d'échantillonnage de la zone industrielle de Bassa.....	41
Figure 13 : Images des puits industriels de la zone industrielle de Bassa.....	42
Figure 14 : Localisation des stations d'échantillonnage de la zone industrielle de Bonabéri.	44
Figure 15 : Images des puits d'eau de la zone industrielle de Bonabéri	46
Figure 16 : Variations spatiales et saisonnières de la couche d'eau et de la température dans les différents sites durant la période de l'étude.....	66
Figure 17 : Variations spatiales et saisonnières de la couleur, des MES, de la turbidité, de la conductivité électrique, des TDS et de la salinité durant la période de l'étude.....	68
Figure 18 : Variations spatiales et saisonnières de l'azote ammoniacal, des nitrites, des nitrates et des orthophosphates dans les sites d'études durant la période de l'étude.....	70
Figure 19 : Variations spatiales et saisonnières de la DCO, de la DBO ₅ , de la Saturation en Oxygène dissous et de l'oxydabilité dans les sites d'étude durant la période de l'étude.	72
Figure 20 : Variations spatiales et saisonnières du pH, du CO ₂ dissous et de l'alcalinité dans les sites d'étude durant la période de l'étude.....	73

Figure 21 : Variations spatiales et saisonnières des duretés calcique et magnésienne dans les sites d'étude durant la période de l'étude.	74
Figure 22 : Hiérarchisation des sites d'étude à partir de données abiotiques obtenues pendant la période d'étude	79
Figure 23 : Analyse en Composantes Principales effectuée à partir des données abiotiques dans les différents sites d'étude	80
Figure 24 : Variations spatiales et saisonnières des abondances et des richesses taxonomiques dans les différents sites d'étude durant la période de l'étude.	90
Figure 25 : Composition taxonomique d'invertébrés récoltés dans les différents sites durant la période de l'étude..	91
Figure 26 : Composition des différentes classes d'invertébrés récoltés dans les différents sites d'étude durant la période de l'étude.	93
Figure 27 : Classification écologique de la faune aquatique souterraine de Douala.....	97
Figure 28 : Fréquences d'occurrence des taxons dans les différents sites durant la période d'étude..	99
Figure 29 : Variations spatiales de l'indice de diversité de Shannon-Weaver et de l'équitabilité de Piélu	100
Figure 30 : <i>Metastenasellus boutini</i> : Habitus, Antenne 1, Antenne 2, Mandibule gauche, Mandibule droite, Maxille 1, Maxille 2 et Maxillipède.....	102
Figure 31 : <i>Metastenasellus boutini</i> : péréiopode 1, péréiopode 2, péréiopode 3 et péréiopode 4.	105
Figure 32: <i>Metastenasellus boutini</i> : péréiopode 5, péréiopode 6 et péréiopode 7.....	106
Figure 33 : <i>Metastenasellus boutini</i> : : pléopode 1, pléopode 2, pléopode 2 ♀, pléopode 3, pléopode 4, pléopode 5 et uropode.	108
Figure 34 : Arbre de voisinage des haplotypes identifiés du gène COI.....	110
Figure 35 : Classification hiérarchique des cellules de la SOM par la méthode de Ward.	112
Figure 36 : Distribution des échantillons sur la carte SOM à partir de la matrice d'abondance des taxa aquatiques souterrains.....	113

Figure 37 A: Patron de distribution des taxa récoltés sur la carte SOM, réalisé à partir de la matrice d'abondance	114
Figure 37 B : Patron de distribution des taxa récoltés sur la carte SOM, réalisé à partir de la matrice d'abondance	115
Figure 37 C: Patron de distribution des taxa récoltés sur la carte SOM, réalisé à partir de la matrice d'abondance	116
Figure 38 : Distribution des taxa aquatiques souterrains dans les différents groupes définis par la SOM.....	117
Figure 39 : Hiérarchisation des sites d'étude à partir de la faune enregistrée pendant la période d'étude	118
Figure 40: Analyse en Composantes Principales effectuée sur la faune aquatique souterraine enregistrée dans les différents sites d'étude.....	119
Figure 41 : Résultats de la PCO réalisée sur la faune aquatique souterraine récoltée.....	121
Figure 42 : Résultats de la dbRDA réalisée à partir des données abiotiques et biotiques enregistrées dans les différents sites durant la période de l'étude	126
Figure 43 : Pléopodes 2 mâles des espèces de <i>Metastenasellus</i> connues.	136

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Sources et/ou facteurs de variation des principaux paramètres physicochimiques et concentrations dans les eaux naturelles.	11
Tableau II : Valeurs de référence des éléments traces métalliques et d'autres métaux dans l'eau	16
Tableau III : Résumé de l'inventaire de la zoocenose mondiale et stygobie	21
Tableau IV: Nombre de familles, genres et espèces de crustacés aquatiques souterrains rencontrés en Afrique	21
Tableau V : Caractéristiques des puits échantillonnés de la zone périurbaine de PK 21	35
Tableau VI : Caractéristiques des puits échantillonnés de la zone de Ndogbong	37
Tableau VII: Caractéristiques des puits échantillonnés de la zone de la Cité SIC	38
Tableau VIII : Caractéristiques des puits échantillonnés de la zone industrielle de Douala Bassa (ZIBA)	40
Tableau IX : Caractéristiques des puits échantillonnés de la zone industrielle de Douala Bonabéri (ZIBO).....	43
Tableau X : Echelle de valeur de l'indice de Shannon et Weaver et sa signification écologique	55
Tableau XI : Valeurs minimales, maximales, moyennes et écart-types des paramètres physicochimiques des eaux souterraines de PK 21	61
Tableau XII : Valeurs minimales, maximales, moyennes et écart-types des paramètres physicochimiques des eaux souterraines de Ndogbong et Cité SIC	62
Tableau XIII : Valeurs minimales, maximales, moyennes et écart-types des paramètres physicochimiques des eaux souterraines de Ndogbong et Cité SIC	64
Tableau XIV : Valeurs minimales, maximales, moyennes et écart-types des paramètres physicochimiques des eaux souterraines de ZIBO.....	65
Tableau XV : Valeurs moyennes saisonnières et écart-types des Eléments Traces Métalliques et d'autres métaux mesurés dans l'eau des différents sites pendant la période d'étude.	76

Tableau XVI : Valeurs moyennes et écart-types des Eléments Traces Métalliques et d'autres métaux mesurés dans les sédiments des différents sites pendant la période d'étude	77
Tableau XVII : Valeurs moyennes et écart-types des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) mesurés dans les sédiments des différents sites pendant la période d'étude	78
Tableau XVIII : Résultats de l'analyse PERMANOVA des données abiotiques enregistrées dans les différents sites d'étude	82
Tableau XIX : Variations du coefficient de corrélation r de Spearman entre les caractéristiques des stations et la physicochimie de l'eau	83
Tableau XX : Liste des familles d'invertébrés récoltés dans le site périurbain de PK 21.....	84
Tableau XXI : Liste des familles d'invertébrés récoltés dans les sites de Ndogbong et Cité SIC.	85
Tableau XXII : Liste des familles d'invertébrés récoltés dans le site industriel de ZIBA.	88
Tableau XXIII : Liste des familles d'invertébrés récoltés dans le site de ZIBO.	89
Tableau XXIV : Liste des taxa d'invertébrés récoltés dans les différents sites durant la période d'étude..	95
Tableau XXV : Différentes tailles de carte de Kohonen et les erreurs de quantification et de topographie correspondantes	111
Tableau XXVI : Récapitulatif saisonnier du nombre d'échantillons récoltés et distribués dans les trois groupes de la carte SOM dans les différents sites d'étude.....	113
Tableau XXVII : Résultats de l'analyse PERMANOVA des données biotiques enregistrées dans les différents sites d'étude	120
Tableau XXVIII : Résultats de la distLm réalisée à partir des données abiotiques et biotiques enregistrées dans les différents sites durant la période d'étude.	125

RESUME

Une étude visant à déterminer l'influence de l'urbanisation et des rejets industriels sur la qualité physicochimique des eaux souterraines et sur la structure des communautés de quelques puits d'eau périurbains, urbains et industriels a été menée dans la ville de Douala durant la période de novembre 2018 à février 2020. Quarante et un (41) puits ont été retenus pour cette étude dans cinq (05) sites, dont dix (10) dans le site périurbain de PK 21, trois (03) à Ndogbong, trois (03) à Cité SIC, quinze (15) dans la zone industrielle de Bassa (ZIBA) et dix (10) autres dans la zone industrielle de Bonabéri (ZIBO). Les paramètres physicochimiques de l'eau considérés ont été analysés suivant les méthodes classiques et la faune a été récoltée à l'aide d'un filet phréatobiologique. Les analyses morphologiques et biomoléculaires ont été effectuées sur les organismes stygobies, disséqués et filmés à l'aide d'un stéréomicroscope codé surmonté d'une caméra de marque Leica Microsystems Model M205 C. Les dessins ont été réalisés à l'aide du logiciel Adobe Illustrator CC 2019 et d'une tablette graphique Wacom Intuos Pro Medium.

L'analyse des variables abiotiques montre que les eaux de puits situés dans la zone périurbaine (PK 21) sont de bonne qualité écologique, car bien oxygénées (51 à 88%), d'une minéralisation moyenne accentuée ($333 \mu\text{S}/\text{cm} < \text{Conductivité} < 666 \mu\text{S}/\text{cm}$) et une faible pollution organique et métallique. Dans les sites urbains et urbains industrialisés par contre, les eaux souterraines sont fortement polluées et présentent dans l'ensemble des teneurs élevées en éléments traces métalliques. En effet, ces sites urbains sont sujets aux pollutions domestiques, municipales et industrielles. Les Analyses de Classification Hiérarchique (ACH), en Composantes Principales (ACP) et Permutationnelle Multivariée des Variances (Permanova) effectuées à partir des paramètres physicochimiques et hydromorphométriques ont montré qu'il y'a un gradient de pollution des différents sites étudiés ; PK 21 étant le site le moins pollué, ceux de Ndogbong, de Cité SIC et de ZIBA sont moyennement pollués, tandis que le site de ZIBO est le plus pollué.

Sur le plan biologique, 4759 organismes ont été recensés dans les cinq sites étudiés. Ces organismes se répartissent en quatre (04) embranchements (Annélides, Arthropodes, Mollusques et Nématelminthes), six (06) classes (Achètes, Oligochètes, Crustacés, Insectes, Gastéropodes et Gordiacés), quatorze (14) ordres et trente (30) familles. La faune du site périurbain de PK 21 est diversifiée avec 196 organismes récoltés répartis dans 15 (quinze) familles, quatre (04) classes et trois (03) embranchements. On y note la présence d'un taxon stygobie appartenant à la famille des Stenasellidae. Dans le site de Ndogbong, la faune est peu diversifiée avec 615 organismes récoltés répartis dans treize (13) familles, cinq (05) classes et

trois (03) embranchements. La faune de Cité SIC est la plus pauvre et diversifiée avec seulement 138 organismes récoltés répartis dans seize (16) familles, trois (03) classes et deux (02) embranchements. Le site de la zone industrielle de Bassa (ZIBA) présente une faune riche et moyennement diversifiée. Au total, 2368 organismes y ont été récoltés et répartis dans dix-sept (17) familles, cinq (05) classes et quatre (04) embranchements. La zone industrielle de Bonabéri (ZIBO) est riche et plus diversifiée avec 1442 organismes recensés et répartis dans vingt-cinq (25) familles, six (06) classes et quatre (04) embranchements. Dans ces sites urbains et industrialisés, la faune est largement dominée par les taxa polluo-résistants tels que les Chironomidae, Lumbriculidae, Cyprididae, Cyclopidae, Culicidae, Psychodidae et Stratiomyidae. Par ailleurs, les fortes abondances de Mollusques (Lymnaeidae et Physidae) hôtes intermédiaires de Trématodes et de Schistosomes dans les sites industriels (ZIBA et ZIBO), pourraient constituer un risque potentiel d'émergence des helminthiases. Aussi, la mauvaise qualité physicochimique des eaux souterraines dans les sites urbains industrialisés et les teneurs élevées en Eléments Traces Métalliques constituent un facteur de risque sanitaire pour les populations riveraines.

Le site périurbain de PK 21 héberge les organismes stygobies de la famille de Stenasellidae. Au total, 35 organismes stygobies (soit environ 18% de la faune de ce site) ont été recensés dans huit (08) des dix (10) puits prospectés. Les investigations morphologiques et biomoléculaires ont montré que ces organismes appartiennent au genre *Metastenasellus* et sont clairement différents de toutes les autres espèces décrites et/ou séquencées du genre. Les eaux souterraines de Douala PK 21 hébergent ainsi une nouvelle espèce, *Metastenasellus boutini*, deuxième espèce du genre signalée au Cameroun après la découverte de l'espèce *Metastenasellus camerounensis*.

Les résultats de la distLM ont montré que les facteurs environnementaux contrôlant la distribution de la faune aquatique souterraine de la ville de Douala sont principalement l'altitude, le pH, le CO₂ dissous, la turbidité et le Magnésium. La température, l'alcalinité, l'oxydabilité, les nutriments (Nitrites, Nitrates et Azote Ammoniacal) et la DCO influencent aussi la distribution de cette faune, mais dans une moindre mesure. La dbRDA indique que seulement 51,5% de la variation totale des paramètres environnementaux explique 17,7% de la variation totale de la stygofaune enregistrée.

Mots clés : Stygofaune, taxonomie intégrative, rejets urbains et industriels, qualité des eaux, Douala

ABSTRACT

A study aimed to determine the influence of urbanization and industrial discharges on the physicochemical quality of groundwater and on the structure of communities of some periurban, urban and industrial groundwater was conducted in the city of Douala during the period from November 2018 to February 2020. Forty-one (41) wells were selected in five (05) sites, including ten (10) in the PK 21 peri-urban site, three (03) in Ndogbong, three (03) in Cité SIC, fifteen (15) in the Bassa industrial zone (ZIBA) and ten (10) others in the Bonabéri industrial zone (ZIBO). The physicochemical parameters of the water considered were analysed according to the classical methods and the fauna was collected using a phreatobiological net. Morphological and biomolecular analyses were performed on stygobitic organisms, dissected and filmed using a coded stereomicroscope with a Leica Microsystems Model M205 C camera. The drawings were made using Adobe Illustrator CC 2019 and a Wacom Intuos Pro Medium graphics tablet.

Analysis of the abiotic variables showed that the well water in the peri urban area (PK 21) is of good ecological quality, as it is well oxygenated (51 à 88%), has an average mineralization ($333 \mu\text{S}/\text{cm} < \text{Conductivity} < 666 \mu\text{S}/\text{cm}$) and a low organic and metallic pollution. In urban and industrialized urban sites, on the other hand, the groundwater is heavily polluted and generally has high levels of heavy metals. Indeed, these urban sites are subjected to domestic, municipal and industrial pollution. Hierarchical (HCA), Principal Component (PCA) and Multivariate Permutational Classification analyses of variances (PERMANOVA) based on the average values of the physicochemical parameters showed that there is a pollution gradient for the different sites studied. The peri urban site of PK 21 is the least polluted, those of Ndogbong, Cité SIC and ZIBA are moderately polluted, while the site of ZIBO is the most polluted.

Biologically, 4759 organisms were recorded in the five study sites. These organisms are divided into four (04) phyla (Annelids, Arthropods, Molluscs and Nematelminthes), six (06) classes (Achaetes, Oligochaetes, Crustacea, Insects, Gastropods and Gordiacea), fourteen (14) orders and thirty (30) families. The fauna of the PK 21 peri urban site is diversified with 196 organisms collected belonging to 15 (fifteen) families, four (04) classes and three (03) phyla. One stygobitic taxon belong to Stenasellidae family, was sampled. At the Ndogbong site, the fauna is not very diversified with 615 organisms collected, belonging to thirteen (13) families, five (05) classes and three (03) phyla. The fauna of Cité SIC is poor and diversified with only 138 organisms collected belonging to sixteen (16) families, three (03) classes and two (02)

phyla. The Bassa Industrial Zone (ZIBA) site has a rich and moderately diversified fauna. A total of 2368 organisms were collected, distributed in seventeen (17) families, five (05) classes and four (04) phyla. The industrial zone of Bonaberi (ZIBO) is richer and more diversified with 1442 organisms recorded and distributed in twenty-five (25) families, six (06) classes and four (04) phyla. In these urban industrialized sites, the fauna is largely dominated by pollutant-resistant taxa such as Chironomidae, Lumbriculidae, Cyprididae, Cyclopidae, Culicidae, Psychodidae and Stratiomyidae. Furthermore, the high abundance of Molluscs (Lymnaeidae and Physidae) intermediate hosts of Trematodes and Schistosomes in the industrial sites (ZIBA and ZIBO), constitute a potential risk of helminthiasis emergence. Also, the poor physicochemical quality of groundwater in urban industrialized sites and the high levels of metallic elements constitute a health risk factor for the neighbouring populations.

The peri-urban site of PK 21 hosts stygobite organisms of the Stenasellidae family. A total of 35 stygobite organisms (i.e. about 18% of the fauna of this site) were recorded in eight (08) of the ten (10) wells. Morphological and biomolecular investigations showed that these organisms belong to the genus *Metastenasellus* and are clearly different from all other described and/or sequenced species of the genus. The groundwater of Douala PK 21 therefore hosts a new species, *Metastenasellus boutini*, the second species of the genus reported in Cameroon after the discovery of the species *Metastenasellus camerounensis*.

The results of the distLM showed that the environmental factors controlling the distribution of the underground aquatic fauna in the city of Douala are mainly Altitude, pH, dissolved CO₂, Turbidity and Magnesium. Temperature, alkalinity, oxidability, nutrients (Nitrite, Nitrate and Ammonium) and COD also influence the distribution of this fauna, but to a lesser extent. The distance-base Redundancy Analysis (dbRDA) reveals that only 51.5% of the total variation in environmental parameters explains 17.7% of the total variation in recorded stygofauna.

Key words: Stygofauna, integrative taxonomy, urban and industrial waste, water quality, Douala.

INTRODUCTION

L'eau est une ressource naturelle indispensable à la vie des êtres vivants et surtout à celle de l'homme. En quantité suffisante et de bonne qualité, elle est indispensable pour la santé et le bien-être de l'être humain (OMS, 2019). Cependant, la majeure partie de l'eau du globe (97%) est contenue dans les océans et est salée, ce qui la rend inutilisable par l'Homme (AIEA, 2022). L'eau douce ne représente que 3% de l'eau sur Terre et seulement 0,7% est accessible à l'Homme (CIEau, 2018) et se trouve soit à la surface de la Terre sous forme de ruisseaux, rivières, fleuves et lacs, soit en profondeur dans des formations poreuses de sub-surface (Danielopol, 1997).

La croissance démographique galopante que connaissent les pays émergents, couplée à leur difficile situation économique, entraînent une urbanisation et une occupation anarchiques des sols, une intensification des activités agricoles et industrielles (Chippaux *et al.*, 2002). Toutes ces pressions anthropiques induisent d'années en années, une augmentation des émissions de polluants de toute nature, dont les écosystèmes aquatiques constituent le réceptacle majeur et en pâtissent les effets néfastes ; entraînant ainsi une hausse continue de la demande en eau (AIEA, 2022) et un approvisionnement difficile en eau potable (Aït Boughrou, 2007). A l'échelle mondiale, 84 % de la population humaine ne disposant pas d'un approvisionnement en eau améliorée vivent dans les zones rurales, c'est-à-dire environ 1,1 milliard de personnes soit 1 Hbt/7 (WHO/UNICEF, 2012). Actuellement, plus de 300 millions de personnes vivant en Afrique n'ont pas accès à l'eau potable. Par ailleurs, environ 30 000 décès sont répertoriés par jour suite aux maladies liées à l'eau, lesquelles constituent ainsi la 5^{ème} cause de décès au monde, avec près de 50 % d'enfants de moins de cinq ans (IRD et Institut Français, 2015).

Au Cameroun, malgré la présence d'eau en quantité suffisante, l'approvisionnement en eau potable reste encore un problème majeur (IRD et Institut Français, 2015). On estime que dans les pays en développement comme le Cameroun, une moyenne de 93 % de toutes les eaux usées domestiques et de 75% des déchets industriels sont déversés dans les eaux de surface (CMR, 2014). Ces dernières sont donc très souvent polluées, impropres aux usages domestiques et leur biodiversité est menacée. Parallèlement, le volume d'eau produit par la CAMWATER ne couvre pas les besoins des populations nécessiteuses. En milieu rural notamment, le déficit d'approvisionnement est plus marqué et moins de 30% des ménages y ont accès à une eau de boisson améliorée (INS, 2013 ; Anonyme *et al.*, 2014). Ceci pose un réel problème car cette situation contraint les populations locales à recourir aux eaux souterraines, précisément aux eaux de sources, de puits et de forages, qu'elles consomment sans très souvent se préoccuper de leur qualité. Dès lors, l'eau souterraine constitue un palliatif privilégié d'approvisionnement

en eau car elle est la plus grande réserve en eau douce liquide sur la terre (Griebler et Avramov, 2015 ; AIEA, 2022). C'est donc ainsi qu'environ 60 % (peut-être 80 %) de la population d'Afrique qui en compte 1 milliard, vit dans les zones rurales et compte sur l'eau souterraine pour approvisionner ses ménages (Vaessen *et al.*, 2015). Malheureusement les eaux souterraines sont directement mises en danger par les activités agricoles, l'urbanisation, l'industrialisation, la demande en eau croissante et les changements climatiques (Chippaux *et al.*, 2002 ; GIEC, 2014). De plus, l'urbanisation accélérée et anarchique, l'accroissement démographique brutale, la vétusté et l'inadaptation des installations de potabilisation, la faiblesse du réseau d'adduction d'eau potable sont autant d'indicateurs qui dénotent de l'urgence dans la mise en œuvre des mesures correctives pour une meilleure protection des eaux souterraines, voire une adéquation entre l'offre et la demande (BUCREP, 2011).

Les eaux souterraines sont considérées comme l'une des plus importantes sources de nouvelles espèces d'invertébrés (Griebler *et al.*, 2010 ; Maurice et Bloomfield, 2012). Malgré cela, le niveau des connaissances sur ce milieu reste extrêmement variable selon les groupes, les régions et les pays, et très souvent corrélé à la présence de chercheurs stygobiologistes ou de laboratoires équipés dans ces régions (Boutin *et al.*, 2011 ; Tuekam Kayo *et al.*, 2012b). Le grand degré de spécialisation, la capacité d'adaptation et l'endémisme de ces communautés d'invertébrés aquatiques souterrains les rendent intéressants pour les chercheurs travaillant sur des questions fondamentales liées à l'évolution, l'écologie, la biodiversité et la physiologie (Danielopol *et al.*, 2000). Leurs études pourraient permettre de mieux comprendre : les processus liés à l'histoire paléogéographique des continents à l'instar de l'Afrique, et pourquoi les insectes, parfaitement adaptés à la majorité des habitats aquatiques de surface, ne réussissent presque pas à se développer dans le milieu souterrain (Deharveng *et al.*, 2009). Cependant, la perte continue de la biodiversité depuis les dernières décennies suggère que les efforts déployés pour réduire cette tendance restent insuffisants (Alvarado-Quesada *et al.*, 2014). Parmi les causes à l'origine de cette baisse de la biodiversité, on peut citer la perte et la destruction des habitats, la surexploitation des ressources naturelles, la pollution et les changements climatiques (UNEP, 2011). Il est donc important d'avoir des connaissances de base sur la biodiversité passée et actuelle, afin de mieux cerner l'ampleur des pertes et de proposer des mesures de conservation les plus adaptées.

Au Cameroun, les études entreprises sur le milieu souterrain ont été plus focalisées sur l'hydrogéologie, la géochimie (Wandji *et al.*, 2010 ; Moucherou *et al.*, 2011), la bactériologie et la physicochimie (Nougang *et al.*, 2011 ; Nola *et al.*, 2012). Peu d'attention a été accordée aux invertébrés peuplant ces milieux. Seuls quelques travaux portant sur la biodiversité et la

qualité des eaux souterraines ont été menés par Zébazé Togouet *et al.* (2009, 2011 et 2013), Tuekam Kayo *et al.* (2012a et b), Tuekam Kayo, 2013 dans la ville de Yaoundé, Nana Nkemegni *et al.* (2015, 2022) dans les Hauts Plateaux du Noun, Chinche *et al.* (2019 et 2023) dans le Département du Fako, région du sud-ouest.

Dans la ville de Douala, agglomération relativement industrialisée et densément peuplée, avec un réseau hydrographique important, très peu de données existent sur la qualité physicochimique et la faune des eaux souterraines. De plus, peu d'études ont été faites sur l'écologie et la structure des communautés peuplant les eaux souterraines des zones industrialisées de Douala. On sait également très peu de choses sur l'influence de l'urbanisation et de l'industrialisation sur la diversité et la structure spatio-temporelle de ces communautés. La présente étude vise à évaluer l'influence de l'urbanisation et des rejets industriels sur la qualité physicochimique des eaux souterraines et sur la structure des communautés de quelques puits d'eau périurbains, urbains et industriels de la ville de Douala.

Plus spécifiquement il s'agit :

- (1) de décrire l'évolution spatiale et saisonnière des quelques paramètres environnementaux et définir les classes de qualité des eaux ;
- (2) d'évaluer la composition et la structure des différents taxa qui colonisent les eaux souterraines de la ville de Douala ;
- (3) de déterminer l'impact des facteurs environnementaux sur la structure des communautés aquatiques souterraines.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres dont le premier est consacré à la revue de la littérature qui présente l'importance et l'évaluation de la pollution des eaux souterraines. Le deuxième chapitre traite du cadre dans lequel cette étude a été menée et du matériel et des méthodes utilisés pour cette étude. La présentation des résultats obtenus, leur interprétation et la discussion qui en découle font l'objet du troisième chapitre. Ce dernier est suivi d'une conclusion, des recommandations et des perspectives de recherche.

CHAPITRE I :
REVUE DE LA LITTERATURE

I.1. Généralités sur les eaux souterraines

Les eaux souterraines représentent environ 97% des eaux douces continentales liquides (Bosca, 2002) et 30 % de l'eau douce de la planète (AIEA, 2022). Elles constituent la principale source d'eau douce de l'humanité (AIEA, 2022). La présence de l'Homme ainsi que ses possibilités de survie dépendent dans plusieurs régions du globe de l'existence et de la qualité de cette ressource limitée et fragile. 75 à 90% de la population mondiale utilisent une eau d'origine souterraine (Aït Boughrous, 2007). C'est dire l'importance de l'étude des nappes souterraines dans toutes leurs composantes en vue d'une meilleure connaissance de ces écosystèmes et d'introduire des concepts scientifiques nouveaux en matière de gestion, d'aménagement, de surveillance, de protection et de conservation (Danielopol *et al.*, 2004).

I.1.1. Définition et origine des eaux souterraines

Les eaux souterraines sont des eaux à l'état liquide et gazeux qui circulent sous terre dans les sables, les fissures des roches et les galeries creusées dans le sol (Ginet et Decou, 1977). Elles proviennent de l'infiltration et l'écoulement des eaux de pluies dans le sol en milieu saturé et non saturé (Vaessen *et al.*, 2015). Celles-ci s'insinuent par gravité dans les pores, les microfissures et les fissures des roches, humidifiant des couches de plus en plus profondes, jusqu'à rencontrer une couche imperméable. Là, elles s'accumulent, remplissant le moindre vide, saturant d'humidité le sous-sol, formant ainsi un réservoir d'eau souterraine appelé aquifère.

I.1.2. Différents types de milieux souterrains

Les milieux souterrains peuvent être terrestres ou aquatiques, ce sont des écosystèmes favorables aux études scientifiques car ils sont généralement bien délimités et contiennent relativement peu d'êtres vivants (Boutin et Coineau, 2004).

I.1.2.1. Milieux souterrains terrestres

Les milieux souterrains terrestres sont essentiellement constitués des grottes et du sous-sol. Les grottes sont des cavités sous la surface de la terre à flanc de colline, de falaise ou de montagne accessible à l'homme (Ginet et Decou, 1977). Elles sont de tailles et de formes variées, et beaucoup d'entre elles ont une grande ouverture en surface. Grâce au processus de l'évolution, certains animaux et plantes se sont très bien adaptés à la vie troglodytique. Le manque de lumière empêchant la pousse des plantes vertes, les champignons représentent par conséquent la seule flore pouvant se développer dans les grottes.

Le sous-sol est un milieu constitué par les éboulis en milieu calcaire ou non, recouvert par une couche de sol suffisante qui réalise une protection déterminante dans les interstices du sous-sol. Les conditions microclimatiques stables y sont comparables à celles qui prévalent dans les grottes.

I.1.2.2. Milieux souterrains aquatiques

Du point de vue écologique, le milieu souterrain aquatique a été divisé en deux grandes catégories fondées sur la nature des terrains dans lesquels les eaux circulent. Selon que leur partie supérieure soit libre ou recouverte d'une couche de terrain imperméable, les gîtes aquifères se subdivisent en deux catégories : les nappes libres ou phréatiques et les nappes captives ou géologiques (Vilaginès, 2003).

I.1.2.2.1. Nappes phréatiques

Daubrée (1987) a introduit l'expression de nappe phréatique pour désigner la nappe d'eau la plus proche de la surface du sol, celle qui alimente les puits et les sources. Ce sont des nappes permanentes dont le niveau varie avec le climat de la région.

Elles sont dites libres car ce sont des nappes d'eaux souterraines dont le niveau piézométrique, peu profond, est lié à la perméabilité du terrain à travers lequel pénètre l'eau d'infiltration (Juberthie, 1995). Elles sont tributaires des variations pluviométriques, et sont les plus exposées aux pollutions de toute nature (Boutin, 1993).

I.1.2.2.2. Nappes géologiques ou nappes captives

Les nappes géologiques sont les nappes d'eau qui se sont formées il y'a plusieurs dizaines de milliers d'années suite à l'accumulation des eaux dans l'espace souterrain et aux écoulements latéraux des couches d'eaux plus ou moins distantes (Juberthie, 1995). Ce sont des nappes très profondes à la recherche desquelles vont les foreurs. Ces grandes profondeurs limitent au maximum les pollutions diverses grâce à l'épuration du sol (Boutin, 1993). Elles sont dites captives car elles sont emprisonnées entre deux couches de terrains imperméables et leur niveau ne varie pas ou du moins très peu et très lentement avec la pluviométrie locale de la région.

I.2. Emergence des eaux souterraines

Toute sortie d'une eau souterraine à la surface du sol peut être désignée par le terme général d'émergence (Ginet et Decou, 1977). Il existe en effet différents types d'émergence

dont certains se prêtent d'ailleurs mieux que d'autres à l'étude biologique (Ginet et Decou, 1977). On peut citer : les sources, les puits et les forages.

I.2.1. Sources

Une source est un exutoire à la surface du sol par lequel, les eaux souterraines se déplaçant suivant la pente de la couche imperméable, apparaissent à l'air libre (Dupont, 1981). Les sources sont généralement utilisées par les populations pour l'approvisionnement en eau de boisson. Selon le mode d'apparition de l'eau à la surface du sol, la source peut être de 3 types (Vilaginès, 2003):

- **Source limnocrène**, source existant là où le niveau de la nappe phréatique est supérieur à celui du terrain; elle forme d'abord un étang dans une dépression; le trop-plein de celui-ci forme ensuite un ruisseau ;
- **Source rhéocrène**, source qui littéralement coule directement hors du sol, l'eau étant souvent libérée sous pression; elle forme directement un ruisseau ;
- **Source hélocrène**, source marécageuse dont l'eau suinte à travers une zone de sol et/ou roche perméable et forme une zone marécageuse relativement grande.

I.2.2. Puits

Un puits est une fosse creusée habituellement par piochage dans le sol pour intercepter le toit de la nappe phréatique (Vilaginès, 2003). Les puits sont divers, par leur profondeur ou par leur volume d'eau. Un puits artésien est un puits profondément foré de sorte que l'eau soit entraînée vers le haut grâce à la pression. Les puits n'atteignent que la nappe phréatique et sont sujets aux pollutions diverses (Vilaginès, 2003). L'eau peut être remontée au niveau du sol grâce à un seau ou une pompe manuelle ou électrique.

I.2.3. Forages

Un forage est un trou très profond souvent creusé mécaniquement dans la terre. Les forages sont considérés comme des puits de grandes profondeurs qui atteignent les nappes géologiques, et munis de pompes. Ils peuvent avoir des débits considérables de l'ordre de 3000 m³/jour (Vilaginès, 2003). Ces grandes profondeurs permettent au maximum d'éviter les risques de pollution et de trouver des nappes ayant un débit relativement élevé (Vilaginès, 2003).

I.3. Caractéristiques des milieux aquatiques souterrains

I.3.1. Obscurité

L'obscurité permanente est l'une des caractéristiques fondamentales de l'environnement souterrain. Elle détermine la quasi-totalité des paramètres biotiques de cet écosystème. Ainsi, la photosynthèse n'existe pas dans les milieux hypogés, et cette absence a des répercussions majeures sur les paramètres tels que les ressources trophiques et la teneur en oxygène.

I.3.1.1. Ressources trophiques

Les milieux souterrains sont, en comparaison des biotopes superficiels photosynthétiques, des écosystèmes énergétiquement limités. Les domaines souterrains sont donc des systèmes hétérotrophes entièrement dépendants de la surface pour les ressources alimentaires (Creuzé des Chatelliers *et al.*, 1991). L'apport trophique n'est assuré que par les infiltrations d'eau drainant la matière organique dissoute ou particulaire dans le milieu hypogé (Ginet et Decu, 1977 ; Juberthie et Decu, 1994 ; Gibert *et al.*, 1994). La flore fongique et bactérienne qui compose le biofilm souterrain représente une source alternative de nutriment pour les macroorganismes hypogés (Barlocher et Murdoch, 1989).

I.3.1.2. Teneur en Oxygène

En raison de l'obscurité permanente, la photosynthèse dans le milieu hypogé est impossible, le rendant totalement dépendant du transport de l'oxygène de la surface vers les aquifères hypogés (Malard et Hervant, 1999). Le renouvellement de l'oxygène dissous dans les eaux souterraines est accompli par diffusion à travers la zone non saturée de l'aquifère ou par recharge avec de l'eau de pluie ou de cours d'eau superficiel (rivière, fleuve) pauvre en oxygène (Malard et Hervant, 1999).

I.3.2. Variabilité des paramètres abiotiques

Les milieux souterrains sont également caractérisés par une variabilité extrêmement réduite des paramètres abiotiques tels que la chimie des eaux, la saturation en eau dans l'atmosphère ou la température (Issartel, 2007). La variabilité des conditions physicochimiques est d'autant plus réduite lorsque les puits sont profonds (Issartel, 2007).

Les milieux souterrains présentent donc une grande stabilité vis-à-vis de certains paramètres biotiques et abiotiques en comparaison aux écosystèmes superficiels, mais sont aussi un biotope contraignant présentant des conditions extrêmes d'hypoxie et de rareté de ressources trophiques.

I.3.3. Physicochimie des eaux souterraines

L'eau souterraine peut être caractérisée par un certain nombre de variables physiques et chimiques.

I.3.3.1. Variables physiques

La Température, les Matières En Suspension (MES), la Turbidité, la Couleur et les Solides Totaux Dissous (TDS) sont les principales variables physiques de l'eau.

La température de l'eau est un facteur important, du fait qu'elle régit la presque totalité des réactions physiques, chimiques et biologiques dans l'environnement. Toute variation brusque de cette variable entraîne une perturbation dans l'équilibre de l'écosystème aquatique. La température d'une eau peut renseigner sur son origine et son écoulement (RéFEA, 2003).

Les Matières En Suspension (M.E.S.) comprennent les particules organiques et minérales transportées dans la colonne d'eau. Elles représentent les matières non solubles en suspension dans l'eau. Ces particules sont arrachées par l'érosion due aux eaux pluviales (Auby *et al.*, 1994).

La turbidité exprime l'état trouble d'une eau ; elle traduit la présence de particules en suspension dans l'eau telle que les débris organiques, les argiles et les organismes microscopiques. Une turbidité forte peut permettre à des micro-organismes de se fixer sur des particules en suspension. Elle est inversement proportionnelle à la transparence de l'eau (RéFEA, 2003).

I.3.3.2. Variables chimiques

Sur le plan chimique, les eaux souterraines peuvent se distinguer par leur pH, leur conductivité électrique, les teneurs en gaz dissous, azote, orthophosphates ainsi que par leur dureté. Le pH détermine la concentration des protons H^+ contenus dans l'eau, et donc l'acidité ou l'alcalinité de l'eau sur une échelle logarithmique de 0 à 14. Il influence la plupart des mécanismes chimiques et biologiques dans les eaux souterraines (RéFEA, 2003). Il dépend en partie, de la nature géologique du bassin de drainage (Nola *et al.*, 1999) et peut également être influencé par les précipitations acides, l'activité biologique et certains rejets industriels.

L'alcalinité de l'eau est sa capacité à neutraliser un acide. L'alcalinité est principalement due aux carbonates, aux bicarbonates et aux hydroxydes. La dureté totale d'une eau correspond à la somme des concentrations en cations métalliques à l'exception des métaux alcalins et des ions hydrogènes. Dans la plupart des cas, la dureté est due aux ions calcium et magnésium (Rodier *et al.*, 2009). Pour des valeurs de dureté comprises entre 0 mg/L et 70 mg/L, l'eau est

dite très douce; entre 70 mg/L et 150 mg/L elle est dite douce; pour des valeurs comprises entre 150 mg/L et 300 mg/L l'eau est moyennement dure, l'eau est dure lorsque les valeurs de sa dureté sont comprises entre 300 mg/L et 400 mg/L; au-delà, l'eau est très dure (Anonyme, 2008).

La mesure de la conductivité électrique permet d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau, car la plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. Par conséquent, elle renseigne sur le degré de minéralisation d'une eau. Les valeurs de la conductivité permettent de mettre en évidence diverses pollutions (RéFEA, 2003 ; Derwich *et al.*, 2010).

Etant l'un des plus importants indicateurs du degré de pollution des eaux, l'oxygène dissous mesure la concentration du dioxygène dissous dans l'eau exprimé en mg/L ou en pourcentage de saturation. Il participe à la majorité des processus chimiques et biologiques en milieu aquatique (RéFEA, 2003).

La présence des ions ammonium dans les eaux, est souvent le signe d'une dégradation incomplète de la matière organique en relation avec le manque d'oxygène. Il est l'indice d'une contamination par des rejets d'origine humaine ou industrielle (Boulanouar, 1995 ; Rodier *et al.*, 2002). C'est un important indicateur de pollution organique. Les nitrites constituent quant à eux, un stade intermédiaire, peu stable, entre les ions ammonium (NH_4^+) et les nitrates (NO_3^-). On ne les rencontre que lorsqu'il existe un déséquilibre au niveau de l'oxygénation et de l'activité de la flore bactérienne de l'écosystème. En dehors de tout apport externe (rejets industriels), les nitrites proviennent soit d'une oxydation incomplète de l'ammoniaque, soit d'une réduction des nitrates sous l'influence d'une action dénitrifiante (Rodier *et al.*, 2009). Les nitrates constituent la forme azotée dominante dans les cours d'eau et dans les nappes d'eau souterraines. Des valeurs élevées de nitrates indiquent des rejets d'eaux usées dans les milieux aquatiques superficiels et souterrains, et surtout une utilisation excessive de fertilisants agricoles (Chapman et Kimstach, 1996). Les orthophosphates ont le plus souvent une origine urbaine (détergents) ou agricole (lessivage d'engrais).

Le tableau I présente les sources de quelques paramètres physico-chimiques et les concentrations (ou valeurs normales) propices à la vie aquatique.

Tableau I : Sources et/ou facteurs de variation des principaux paramètres physicochimiques et concentrations dans les eaux naturelles (Rodier et al., 2009 ; OMS, 2011)

Paramètres	Sources	Normes dans les eaux naturelles*
------------	---------	----------------------------------

Température	Industries (électriques, métallurgiques, chimiques ou pétrolières) utilisant l'eau comme fluide réfrigérant	La température de rejet des eaux usées doit être $\leq 25^{\circ}\text{C}$
pH	Industries, tanneries et teintureriers	Le pH doit être compris entre 6,6 et 7,8
Conductivité électrique	Industries productrices d'eaux fortement salines, minéralisation de la matière organique	25 à 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans les eaux naturelles
Chlorures	Eaux usées, effluents industriels. Une pollution aux chlorures s'accompagne généralement d'une augmentation du Sodium et du Potassium	Teneurs inférieures à 20 mg/L dans les eaux courantes
Sodium et Potassium	Apports industriels, lessivages, percolation de terrains salés (sodium)	Teneurs < 200 mg/L (Na) et $10 - 15$ mg/L (K) dans les eaux naturelles
Sulfates	Effluents industriels et urbains, lessivage des sols agricoles	Teneurs inférieures à 20 mg/L
Calcium et Magnésium	Effluents industriels et urbains	Teneurs en Calcium comprises entre 1 et 150 mg/L, teneurs en Magnésium comprises entre 5 et 10 mg/L selon la nature des terrains traversés
Alcalinité (mg/L de HCO_3^-)	Apports polluants d'origine urbaine (phosphate, ammoniacale, matières organiques) ou industriels	varie de 10 à 350 mg/L dans les eaux naturelles (sur sol calcaire)
DBO ₅ (mg/L d'O ₂)	Effluents domestiques et industriels chargés en matière organique	< 5 mg/L
Oxydabilité (mg/L d'O ₂)	Effluents domestiques, industriels et urbains chargés en matière organique	5 mg/L
Matières en suspension (MES)	Déboisements (qui accélèrent l'érosion des sols), ouverture de routes, extractions en rivières, crues	Valeurs presque toujours inférieures à 25 mg/L en dehors des périodes de crues, situation anormale à partir de 75 mg/L
Nitrates (mg/L NO_3^-)	Engrais, déjections animales, rejets urbains et industriels	Teneur en $\text{NO}_3^- < 50$ mg/L
Nitrites (mg/L NO_2^-)	Détergents, lessivage des sols agricoles, pollution par les eaux vannes, hypoxie	Les teneurs en $\text{NO}_2^- < 3$ mg/L
Ammonium (mg/L NH_4^+)	Déchets végétaux et animaux contenus dans les sols, rejets domestiques, urbains et industriels	Teneur en $\text{NH}_4^+ < 0,5$ mg/L dans les eaux souterraines
Phosphates (mg/L PO_4^{3-})	Engrais, détergents, eaux traitées aux phosphates, eaux vannes	Teneur en $\text{PO}_4^{3-} < 0,5$ mg/L dans les eaux naturelles

I.3.3.3. Métaux lourds et éléments traces dans les eaux

Le terme métaux lourds désigne l'ensemble des métaux de forte masse atomique et généralement toxiques pour les êtres vivants, même à des faibles concentrations. Certains sont des oligo-éléments biogènes souvent doués de propriété hermétique, d'autres étant sans intérêt pour les êtres vivants et souvent très toxique (Ramade, 2005).

Les éléments traces sont les éléments constitutants de la croûte terrestre, dont la teneur est pour chacun inférieur à 0,1%. Le terme élément trace métallique (ETM) regroupe les éléments traces qui présentent une masse volumique supérieure à 6g/cm³ (Baize, 1997).

Dans la science environnementale, les métaux lourds associés aux notions de pollution et de toxicité sont généralement : l'Arsenic (As), le Chrome (Cr), le Cadmium (Cd), le Cuivre (Cu), le Mercure (Hg), le Manganèse (Mn), le Nickel (Ni), le Plomb (Pb), l'Étain (Sn), le Zinc (Zn) (Stéphanie et *al.*, 1997).

Les métaux sont généralement séparés en deux catégories selon leur caractère essentiel ou non pour les êtres vivants. En effet, ils peuvent s'avérer indispensables au déroulement des processus biologiques (oligo-éléments), c'est le cas du Fer (Fe), du Cuivre (Cu), du Zinc (Zn), Nickel (Ni), du Cobalt (Co), du Molybdène (Mo), du Manganèse (Mn). Dans ce cas, leurs concentrations dans les organismes doivent répondre aux besoins métaboliques de ces derniers. Dans le cas contraire, une carence ou un excès de ces éléments nécessaires à la vie peuvent entraîner des effets néfastes. Certains métaux lourds peuvent être préjudiciables comme le Mercure (Hg), le Plomb (Pb), le Cadmium (Cd) et l'Antimoine (Sb) (Casas-stellio, 2005).

I.3.3.3.1. Source des métaux lourds dans les eaux

Les métaux lourds qui entrent dans l'environnement aquatique proviennent de sources naturelles et de sources anthropogènes. Leur entrée peut être le résultat soit de déversements effectués directement dans les écosystèmes aquatiques, soit d'un cheminement indirect comme dans le cas de la décharge sèche et humide et du ruissellement agricole. Parmi les importantes sources naturelles, l'activité volcanique, l'altération des continents et les incendies des forêts peuvent être cités. La contribution des volcans peut se présenter sous forme d'émission volumineuse mais sporadiques dues à une activité explosive, ou d'émission continues de faibles volumes, résultat notamment de l'activité géothermique et du dégazage du magma (Zoller, 1984)

Les sources anthropogènes sont les suivants : les effluents d'extraction minière, industriels, et domestiques, le ruissellement orageux urbains, le lessivage de métaux provenant de décharges d'ordures ménagères et de résidus solides, les apports de métaux provenant de zones agricoles (métaux contenus dans les pesticides), les sources atmosphériques (combustion de carburants fossiles, l'incinération des déchets et émissions industrielles), les activités pétrochimiques (Biney *et al.*, 1994).

I.3.3.3.2. Effets des métaux lourds

Quelques métaux lourds, sont indispensables à la croissance et au bien-être des organismes vivants, y compris de l'homme. On peut néanmoins s'attendre à ce qu'ils aient des effets toxiques quand les organismes sont exposés à des niveaux de concentration supérieurs à ceux qu'ils requièrent normalement. D'autres éléments, comme le Cr et le Cd, ne sont pas indispensables aux activités métaboliques et manifestent des propriétés toxiques. La contamination de l'environnement aquatique par les métaux lourds peut avoir des effets toxiques aigus ou chroniques.

Les métaux peuvent être absorbés sous la forme inorganique ou sous la forme organique. Pour certains éléments, comme l'Arsenic et le Cuivre, la forme inorganique est la plus toxique. Pour d'autre, comme le Chrome et le Plomb, les formes organiques sont les plus toxiques.

Dans les années 50, leurs effets hautement nocifs ont été mis en évidence suite à l'intoxication mortelle survenue à Minamata au Japon. Les habitants avaient mangé du poisson contaminé par des rejets mercuriels d'une usine située à proximité. Cette maladie (hydrargyrisme) s'est ensuite propagée à toute la jeune génération par le lait maternel (Jica *et al.*, 2008)

Des nombreuses études ont été consacrées à la toxicité des métaux et sur la base des résultats, plusieurs organisations internationales ont élaboré des critères de qualité des eaux pour la vie aquatique (Biney *et al.*, 1994).

I.3.3.3.3. Toxicité des métaux lourds

Les métaux lourds provoquent des dommages neurocomportementaux irréversibles se développant chez beaucoup de mammifères, mais les mécanismes de ces dommages sont inconnus (Akins *et al.*, 1992). De nombreux métaux sont considérés comme cancérogènes pour l'homme et les animaux ou les deux. Le chrome, le platine et les dérivés inorganiques du mercure sont responsables aussi de dommages, principalement au niveau des tubules proximaux des reins (Lu, 1991).

I.3.3.3.3.1. Toxicité du plomb

Le plomb est un métal bleuté brillant, très mou, très malléable et ductile. Il ternit au contact de l'air humide, ne réagit ni avec l'oxygène, ni avec l'eau il est attaqué par l'acide nitrique. Ses composés sont toxiques par inhalation ou ingestion. Les effets sont cumulatifs. (Witterners *et al.*, 2002). C'est un élément chimique toxique, par effet cumulatif, pour l'homme, la faune et la flore (Chassard-Bouchaud, 1995). Il peut être absorbé par l'organisme par inhalation, ingestion, contact cutané (principalement lors d'une exposition professionnelle) (Moore *et al.*, 1980) ou par transmission à travers le placenta (Angell et Lavery, 1982). La présence de plomb dans

l'organisme peut provoquer des troubles tels que le saturnisme, des crises d'épilepsie voire même des troubles nerveux et psychiques. Pour les personnes les plus exposées, il existe un risque d'avortement spontané, et d'accroissement du nombre de cancers du poumon ou du tractus gastro-intestinal (Chassard-Bouchaud, 1995). Il provoque la toxicité sur les organismes à partir de 0,1mg/l (Gaujous, 1995). L'intoxication aiguë provoque une néphropathie tubulaire, avec anurie, parfois associé à des troubles neuromusculaires (Ramade, 2000). Une exposition chronique peut entraîner des risques d'hypofertilité, de malformation fœtale (Savary, 2003). Une dose de 1mg de plomb est suffisante pour engendrer rapidement le saturnisme (Viala et Botta, 2005). L'intoxication chronique se caractérise par l'apparition d'une anémie, d'un liseré dû au plomb au niveau de la gencive, d'une anoxie, de gastralgie, etc. (Benecke *et al.* 2004).

I.3.3.3.2. Toxicité du cadmium

On identifie le cadmium comme un polluant extrêmement toxique (Godt *et al.*, 2006). Même à de faibles concentrations, il tend à s'accumuler dans le cortex rénal sur de très longues périodes (50 ans) où il entraîne une perte anormale de protéines par les urines (protéinurie) et provoque des dysfonctionnements urinaires chez les personnes âgées. (Casas *et Stellio*, 2005). Il s'accumule également dans des organes tels que la rate, le cerveau, les poumons, le muscle, le sang. Sa toxicité est liée à la perturbation du métabolisme du zinc et secondairement d'autres éléments essentiels tels que le calcium, le fer et le cuivre. Le cadmium est aussi considéré comme un agent carcinogène (Waalkes, 2000). Le rein semble être l'organe le plus touché par les méfaits du cadmium (Barbier *et al.*, 2005), car il affecte les cellules des tubules proximaux, provoquant l'excrétion urinaire de protéines de faible poids moléculaire, d'acide aminés et de glucose (Benecke *et al.*, 2004). Il existe plusieurs preuves de la cancérrogénicité du cadmium, notamment en ce qui concerne le cancer rénal chez l'Homme (Kolonel, 1976 ; Il'yasova et Schwartz, 2005).

L'étude de Watjen *et al.* (2004), a montré que les basses concentrations du cadmium qui lancent la mort programmée de cellules peuvent mener à une mort sélective de cellules dans des régions différentes du cerveau par l'intermédiaire de la génération d'effort oxydant.

I.3.3.3.3. Toxicité du chrome

La toxicité des composés du chrome dépend principalement de leur valence et leurs propriétés physico-chimiques (loi canadienne sur la protection de l'environnement, 1994). Le chrome hexavalent, beaucoup plus soluble et assimilable, représente un polluant potentiellement plus nocif que le chrome trivalent plus stable (Jeannot *et al.*, 2002). Les tests

de toxicité effectués, sur différents organismes, ont montré que des concentrations supérieures à 100 mg de Cr (VI)/Kg de poids peuvent devenir létales pour l'homme (Richard, 1991).

Le chrome (VI) peut avoir d'autres conséquences qui sont des éruptions cutanées, des ulcères, des problèmes respiratoires, de système immunitaire affaibli, les dommages au foie et aux reins, il peut aussi altérer le matériel génétique et provoquer des cancers (Mohanty *et al.*, 2005). L'absorption excessive de chrome (III) peut aussi provoquer des problèmes de santé, telles que des éruptions cutanées, l'anémie et même le cancer. Un contact avec du chrome contenu dans l'eau, des poussières ou des particules de sol provoque des allergies cutanées (Norseth, 1981 ; Otabong, 1990 ; Schubert, 1997).

Tableau II : Valeurs de référence des éléments traces métalliques (ETM) et d'autres métaux dans l'eau (Rodier *et al.*, 2009)

ETM et autres métaux	Normes (mg/L)
Plomb, Pb	0,01
Cadmium, Cd	0,003
Chrome, Cr	0,05
Cuivre, Cu	2
Nickel, Ni	0,02
Zinc, Zn	3
Arsenic, As	0,01
Fer, Fe	0,3
Manganèse, Mn	0,5
Etain, Sn	Pas de valeur limite
Polonium, Po	//
Cobalt, Co	<0,01 (eaux naturelles) et ≤ 1
Baryum, Ba	0,7
Bore, B	0,3
Silicium, Si	//
Antimoine, Sb	0,005
Sodium, Na	< 200
Potassium, K	≤ 1 500
Aluminium, Al	0,2
Calcium, Ca	100 à 140
Magnésium, Mg	50
Mercure, Hg	0,001
Sélénium, Se	0,01

I.3.3.4. Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) comportent plusieurs noyaux benzéniques accolés ou soudés, l'entité chimique de base étant le noyau benzénique hexagonal. Ces produits sont très répandus et proviennent en grande partie, mais non exclusivement, de la

pyrolyse des hydrocarbures ou de leur combustion (moteurs, chauffage, etc.). Les HAP se retrouvent dans les eaux usées industrielles, notamment de l'industrie pétrolière. Sauf pollution, les eaux souterraines n'en contiennent que quelques dizaines de nanogrammes par litre (Rodier *et al.*, 2009). Ils sont connus pour être cancérigènes. Les directives du Conseil des Communautés Européennes et la Réglementation Française indiquent comme teneur en hydrocarbures polycycliques aromatiques une valeur limite globale de 0,1 µg/L (Rodier *et al.*, 2009).

Les données physicochimiques sont ponctuelles ; elles ne prennent pas en compte certains micropolluants difficiles à déceler et ne donnent qu'une image approximative du milieu aquatique. En effet, il ne suffit pas de connaître la quantité d'un polluant dans un écosystème pour être capable d'évaluer avec précision sa disponibilité et son impact sur les composantes biotiques car, les perturbations anthropiques interagissent de façon complexe avec les écosystèmes aquatiques et les effets sont difficiles à identifier en utilisant uniquement des variables abiotiques (Petesse *et al.*, 2007). Les méthodes biologiques s'avèrent être plus performantes pour évaluer l'état des écosystèmes aquatiques car elles intègrent de façon continue les variations temporelles des conditions du milieu (Menétrey Perrottet, 2009).

I.4. Importance des milieux aquatiques souterrains

Longtemps considérés comme des milieux essentiellement minéraux et particulièrement défavorables à la vie, l'importance écologique des eaux souterraines a été reconnue depuis les trente dernières années (Gibert et Culver, 2009).

Les eaux souterraines, avec un niveau de protection plus efficace par rapport à celui des eaux de surface, offrent une gamme variée de services allant du simple approvisionnement en eau potable à leur utilisation pour des activités récréatives et sources de revenus en passant par la protection de la biodiversité (Margat, 2008 ; Mace *et al.*, 2012 ; Margat et Vazken, 2014 ; Griebler et Avramov, 2015).

Les milieux souterrains sont des réservoirs d'eau et de biodiversité des espèces.

I.4.1. Réservoir d'eau

A l'exception des glaces non directement utilisables, les eaux souterraines constituent le plus grand réservoir d'eau douce mondial renfermant près de 98 % des eaux douces continentales directement mobilisables (Gibert et Culver 2004). Composante essentielle du cycle de l'eau et constituant la dimension verticale des hydrosystèmes fluviaux (Amoros et Petts, 1993; Castany, 1998), les eaux souterraines assurent de nombreuses et importantes

fonctions hydrologiques (régulation des régimes hydrologiques des cours d'eau), et écologiques (échanges de matière, d'énergie et d'organismes dans le fonctionnement des écosystèmes aquatiques) (Gibert *et al.*, 1994 ; Brunke et Gonser, 1997 ; Ward, 1998 ; Malard *et al.*, 2003). Offrant de plus des propriétés de qualité et de protection souvent supérieures à celles des eaux superficielles qui sont généralement plus polluées, les eaux souterraines présentent une importante valeur socioéconomique en tant que ressource naturelle inestimable pour les besoins agricoles, industriels et domestiques dans les pays développés et en voie de développement (Danielopol *et al.*, 2003, Gibert *et al.*, 2004).

I.4.2. Réservoir de biodiversité

Les milieux souterrains sont le réservoir d'une diversité biologique originale composé d'organismes dont la plupart n'ont pas d'équivalent dans les écosystèmes aquatiques de surface (Rouch et Danielopol, 1987) et dont certaines lignées sont anciennes de plusieurs dizaines voire centaines de millions d'années (Boutin, 1993 ; Danielopol *et al.*, 2000 ; Humphreys, 2000).

Cette biodiversité souterraine est inégalée, relique, originale et adaptée, comparée à celle des écosystèmes superficiels et capable de coloniser une gamme variée d'habitats à l'échelle continentale (Piscart *et al.*, 2008, 2011 ; Dole-Olivier *et al.*, 2009 ; Griebler et Avramov, 2015).

Ces organismes constituent par ailleurs un patrimoine biologique inestimable (Malard *et al.*, 1997). En effet, tous les grands phylums du règne animal, depuis les Protozoaires jusqu'aux Vertébrés, en passant par les divers groupes de vers, de Mollusques et surtout d'Arthropodes, ont des représentants dans les eaux souterraines. Cette faune peut être échantillonnée par différentes techniques adaptées, au niveau des puits ou des forages, des sources, et des alluvions des cours d'eau et bien sûr des grottes. Ces écosystèmes abritent une faune aquatique extrêmement diversifiée, qui renferme de nombreuses espèces à caractère endémique et dont l'origine est souvent en relation avec l'histoire géologique de la région et les possibilités de colonisation offertes par ce milieu (Juberthie, 1983). Autant dire qu'il s'agit de réels témoins vivant de l'histoire biologique et géologique de la planète (Rouch et Danielopol, 1987 ; Malard *et al.*, 1997).

I.5. Communautés biologiques en milieu aquatique souterrain et leurs adaptations

Du point de vue biologique, plusieurs organismes peuvent être rencontrés dans les eaux souterraines en fonction de leurs adaptations.

I.5.1. Classification des communautés biologiques aquatiques souterraines

Depuis le début de la biospéléologie, plusieurs classifications des organismes souterrains ont été proposées (Vandel, 1964). La classification la plus utilisée aujourd'hui et retenue dans ce travail est celle proposée par Thienemann (1925) qui a ensuite été complétée par différents auteurs (Williams et Hynes 1974, Marmonier *et al.*, 1993, Gibert *et al.* 1994) :

- Les **stygoxènes** correspondent aux espèces typiquement épigées qui n'ont aucune affinité avec le domaine aquatique souterrain mais qui peuvent y être rencontrés accidentellement (**Figure 1**) ;
- Les **stygoiphiles** correspondent aux espèces épigées qui ont une certaine affinité avec le domaine aquatique souterrain pouvant y exploiter les ressources et réaliser partiellement ou totalement leur cycle vital (**Figure 1**) ;
- les **stygobies** ou **stygobiontes** correspondent aux espèces morphologiquement, physiologiquement et/ou éthologiquement adaptées aux eaux souterraines et qui réalisent la totalité de leur cycle biologique exclusivement dans ce milieu (**Figure 1**).

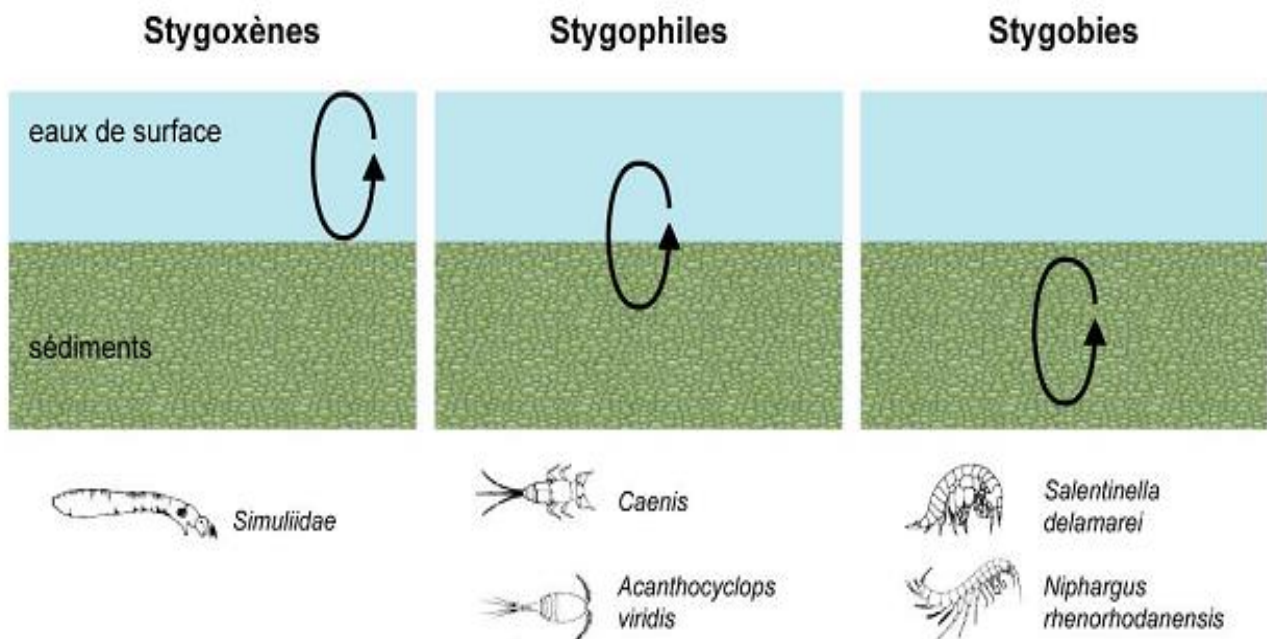


Figure 1 : Classification écologique des invertébrés souterrains aquatiques (Marmonier *et al.*, 1993).

La biodiversité souterraine représente une part significative de la biodiversité mondiale et comprend tous les grands groupes zoologiques constituant les invertébrés souterrains, certaines lignées étant anciennes de plusieurs dizaines de millions d'années (**Figure 2**).

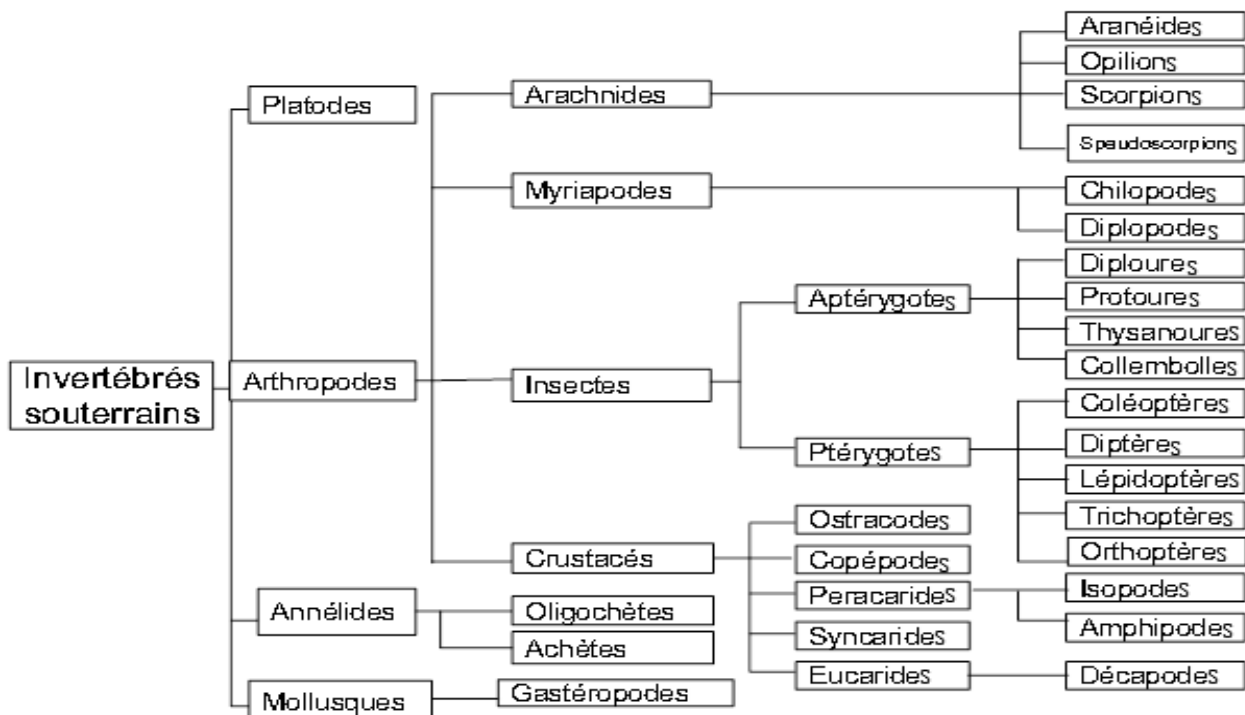


Figure 2 : Classification des différents invertébrés souterrains (Boutin *et al.* , 2011).

I.5.2. Biodiversité aquatique souterraine

A l'échelle mondiale, de nombreuses prospections et études biologiques ont été menées sur les eaux souterraines. Près de trois siècles après la description du protée, le catalogue « *Stygofauna mundi* » de Botosaneanu (1986) reste l'unique recensement de la diversité de la faune aquatique souterraine (Ferreira, 2005). Ce catalogue et l'*Encyclopaedia Biospeologica* de Juberthie et Decou (1994 ; 2001) font l'état des connaissances stygofaunistiques dans près de 160 pays distribués sur les 07 continents. Cette encyclopédie recense 3700 espèces connues. En Afrique, l'essentiel des recherches stygobiologiques ont été concentrées au Maghreb. Cependant, d'après Deharveng *et al.* (2009), la distribution de la biodiversité aquatique souterraine reste peu connue. En Europe, par exemple, Juberthie et Decou (2001) ont signalé environ 2000 espèces connues, bien que pour Sket (2004), ce nombre est largement sous-estimé.

Les publications actuelles ne font pas état d'une perte de biodiversité dans les eaux souterraines mais elles montrent plutôt une tendance à une hausse au regard du recensement fait dans *Stygofauna mundi* (**Tableau III**). Selon l'estimation de Culver et Holsinger (1992), le nombre réel d'espèces animales souterraines aquatiques et terrestres pourrait se situer entre 50000 et 100000 à l'échelle de la planète, dont environ 1/3 serait stygobie.

Les eaux souterraines sont considérées à cette même échelle, comme l'une des plus importantes sources de nouvelles espèces d'invertébrés (Griebler *et al.*, 2010 ; Maurice et

Bloomfield, 2012). Malgré cela, le niveau des connaissances sur ce milieu reste extrêmement variable selon les groupes, les régions et les pays, et très souvent corrélé à la présence de chercheurs stygobiologistes ou de laboratoires équipés dans ces régions (Boutin *et al.*, 2011 ; Tuekam Kayo *et al.*, 2012b).

Tableau III : Résumé de l'inventaire de la zoocenose mondiale et stygobie (Ferreira, 2005)

Groupe Zoologique	Faune Mondiale	Stygofauna Mundi
Protozoa	30800	1015
Invertébrés mineurs	9300	481
Porifera	5000	15
Cnidaria, Ctenophora	9000	24
Turbellaria	12200	199
Nematoda	12000	322
Byozoa	4000	3
Brachiopoda	350	2
Mollusca	50000	456
Annelida	12000	510
Crustacea	39000	
	Cladocera	5
	Ostracoda	309
	Copepoda	997
	Remipedia	5
	Mystacocarida	13
	Syncarida	154
	Mysidacea	22
	Mictacea	1
	Isopoda	569
	Amphipoda	664
	Thermosbaenacea	10
	Decapoda	121
Insecta	751000	24
Arachnida	63000	590
Echinoderma	6100	5
Urochordata	1250	12
Cephalochordata	23	
Vertebrata		
	Agnatha	63
	Chondrichthyes	843
	Osteichthyes	18150
	Amphibia	4184
	Reptilia	6300
	Aves	9040
	Mammalia	4000
Total	1047603	6634

Un recensement récent des études des eaux souterraines africaines fait état de la présence de 269 espèces de crustacés (**Tableau IV**) (Tuekam Kayo *et al.*, 2012a).

Tableau IV: Nombre de familles, genres et espèces de crustacés aquatiques souterrains rencontrés en Afrique (Tuekam kayo *et al.*, 2012a)

Ordre	Familles	Genre	Espèces/sous-espèces
Amphipoda	13 (1)	23 (11)	65

Bathynellacea	2	21 (13)	31
Cyclopoida	1	11	20
Harpacticoida	3	10 (1)	49
Decapoda	3 (1)	6 (1)	11
Isopoda	6	23 (12)	80
Podocopida	1	3 (3)	8
Spelaeogriphacea	1	1 (1)	1
Thermosbaenacea	2 (1)	2 (1)	4
Total	32	100	269

() Nombre de familles ou genres endémiques d'Afrique.

On constate que les Bathynellacés, les Amphipodes et les Isopodes sont les groupes qui ont présentement le plus grand nombre de genres endémiques à l'Afrique (**Tableau IV**). Après les Amphipodes, l'Ordre des Isopodes est assez bien représenté avec 06 familles pour quatre-vingt (80) espèces (Tuekam Kayo *et al.*, 2012a et b). Les genres *Proasellus* (Asellidae), *Marocolana*, *Saharolana*, *Typhlocirolana* (Cirolanidae), *Microcerberus* (Microcerberidae), *Microcharon* (Microparasellidae) sont uniquement connus du Maghreb. On y retrouve également les genres *Magniezia*, *Metastenasellus* et *Johanella* (Stenasellidae) (Boutin *et al.*, 2011 ; Tuekam Kayo *et al.*, 2012a).

En Afrique de l'Ouest, on connaît les Stenasellidae en Côte d'Ivoire (*Magniezia africana* Monod, 1945 ; *Metastenasellus tarrissei* Magniez, 1979 ; *Parastenasellus chappuisi* Remy, 1938), au Sénégal (*Magniezia studiosorum* Sket, 1969), au Niger (*Metastenasellus powelli* Magniez, 1969), au Bénin (*Metastenasellus sp.*, Boutin, *pers. Obs.*). En Afrique de l'Est, ces derniers sont connus de la Somalie et du Kenya avec le genre *Stenasellus*. En Afrique Centrale, les études menées sur la faune souterraine ont été essentiellement réalisées en République Démocratique du Congo (Chappuis, 1951 et 1952) et au Cameroun (Zébazé Togouet *et al.*, 2009, 2011, 2013 ; Tuekam Kayo *et al.*, 2012a et b) et montrent que les Stenasellidae y sont représentés essentiellement par le genre *Metastenasellus*. Ainsi, on connaît des Stenasellidae en Afrique du Nord jusqu'en Afrique Centrale ; ce sont donc des genres assez communs dans cette région et les études en cours pourront permettre la découverte d'un plus grand nombre d'espèces.

Si depuis l'avènement de la vie sur terre, les hommes ont voulu connaître le monde et les individus qui le peuplaient, ce n'est qu'au début du 17^{ème} siècle que l'existence d'une vie sous terre a été reconnue grâce à la découverte du premier animal souterrain cavernicole : le

protée (Ginet et Decou, 1977). Pourtant les travaux anciens, c'est-à-dire environ 200 ans après la découverte du protée (cf. Ferreira, 2005) et récents démontrent à suffisance que les habitats aquatiques souterrains diffèrent de ceux de la surface en terme de diversité d'espèces d'insectes et de crustacés (Deharveng *et al.*, 2009. Griebler *et al.*, 2010). En effet, dans les habitats aquatiques superficiels, les insectes sont plus abondants par rapport aux autres écosystèmes, mais trouvent cependant dans les habitats aquatiques souterrains un milieu favorable pour le développement des œufs et des larves (Zhang, 2011). À ce jour, bon nombre d'espèces d'insectes n'ont pas pu développer des aptitudes leur permettant de s'adapter à une vie aquatique souterraine stricte. D'après Deharveng *et al.* (2009), seulement environ deux espèces d'insectes sont reconnues comme souterraines en Europe.

Le grand degré de spécialisation, la capacité d'adaptation et l'endémisme des communautés d'invertébrés aquatiques souterrains les rendent intéressants pour les chercheurs travaillant sur des questions fondamentales liées à l'évolution, l'écologie, la biodiversité et la physiologie (Danielopol *et al.*, 2000). Leurs études pourraient permettre de mieux comprendre : les processus liés à l'histoire paléogéographique des continents à l'instar de l'Afrique, et pourquoi les insectes, parfaitement adaptés à la majorité des habitats aquatiques de surface, ne réussissent presque pas à se développer dans le milieu souterrain (Deharveng *et al.*, 2009).

Cependant, la perte continue de la biodiversité depuis les dernières décennies suggère que les efforts déployés pour réduire cette tendance restent insuffisants (Alvarado-Quesada *et al.*, 2014). Parmi les causes à l'origine de cette baisse de la biodiversité, on peut citer la perte et la destruction des habitats, la surexploitation des ressources naturelles, la pollution et les changements climatiques (UNEP, 2011). Il est donc important d'avoir des connaissances de base sur la biodiversité passée et actuelle, afin de mieux cerner l'ampleur des pertes et de proposer des mesures de conservation les plus adaptées.

Au Cameroun, les études entreprises sur le milieu souterrain ont jusqu'ici été essentiellement effectuées au niveau des aquifères poreux, les milieux karstiques y étant peu fréquents (Juberthie et Decou, 1994). Les premiers travaux menés dans ce domaine ont été plus focalisés sur l'hydrogéologie, la géochimie (Wandji *et al.*, 2010, Mouncherou *et al.*, 2011), la bactériologie et la physicochimie (Nougang *et al.*, 2011, Nola *et al.*, 2012). Peu d'attention a été accordée aux invertébrés peuplant ces milieux. Seuls quelques travaux portant sur la biodiversité et la qualité des eaux souterraines ont été menés par Zébazé Togouet *et al.* (2009, 2011 et 2013), Tuekam Kayo *et al.* (2012a et b), Tuekam Kayo, 2013 dans la ville de Yaoundé, Nana Nkemegni *et al.* (2015, 2022) dans les Hauts Plateaux du Noun, Chinche *et al.* (2019 et 2023) dans le Département du Fako, région du sud-ouest. La prospection des eaux souterraines

de la ville de Yaoundé a permis la découverte et la description par Zébazé Togouet *et al.* (2013) d'une première espèce de Crustacés Isopodes de la famille de Stenasellidae et du genre *Metastenasellus*, *Metastenasellus camerounensis*. Cette faune stygobionte s'est enrichie avec la découverte récente d'un nouveau genre de Crustacés Isopodes de la famille de Cirolanidae, genre *Cameroulana* avec l'espèce *Camerounolana bamounensis* dans les eaux souterraines du Plateau Bamoun (Nana Nkemegni *et al.*, 2022).

I.5.3. Adaptation des organismes au milieu aquatique souterrain

Les animaux qui peuplent les milieux souterrains ont tous des ancêtres d'origine superficielle (Notemboom, 1991 ; Coineau et Boutin, 1993). Durant la colonisation du milieu hypogé, l'espèce ancestrale a progressivement « évolué » vers la forme souterraine qui est observée aujourd'hui. Cette évolution, due aux paramètres abiotiques et biotiques sélectifs du milieu, implique de nombreux changements adaptatifs tant du point de vue morphologique que métabolique.

I.5.3.1. Modifications morphologiques

L'absence de rayonnement lumineux a pour conséquence l'apparition de modifications morphologiques particulières et convergentes dont les plus répandues sont :

- Une dépigmentation générale d'intensité variable du corps. Chez les animaux épigés, la pigmentation protège l'organisme des rayons solaires, et en particulier des ultraviolets. Dans les milieux souterrains, ce genre de protection, coûteuse en énergie, peut être considérée comme inutile;
- Une régression oculaire plus ou moins importante, allant de la microphthalmie jusqu'à l'anophtalmie;
- La perte de la vue est compensée par une hypertrophie des autres organes sensoriels (allongement des appendices et multiplication des récepteurs chimiques et mécaniques).

I.5.3.2. Modifications éthologiques, physiologiques et métaboliques

Les organismes souterrains présentent également des modifications éthologiques, physiologiques et métaboliques dont les plus importantes sont les suivantes :

- ❖ Reproduction : en général cyclique chez plusieurs organismes épigés, elle est relativement constante chez les hypogés lorsque les conditions environnementales sont favorables (Ginet et Decou, 1977 ; Mathieu et Turquin, 1992).

- ❖ Longévité : les animaux souterrains se distinguent également des animaux épigés par leur forte longévité. Par exemple, l'amphipode stygobie *Niphargus rhenorhodanensis* vit environ 10 ans alors que son homologue superficiel *Gammarus fossarum* ne vit que 2 ans.
- ❖ Adaptations à l'hypoxie : En condition anoxique expérimentale, les animaux souterrains montrent, une diminution drastique de l'activité locomotrice (Hervant et Malard, 2005). Cette adaptation comportementale a pour effet de réduire les coûts énergétiques durant les périodes de basse teneur en oxygène et par conséquent, d'augmenter le temps de survie dans les eaux souterraines hypoxiques. L'hypométabolisme qui caractérise les animaux hypogés a longtemps été relié à la pauvreté en nourriture (Hervant et Malard, 2005), mais il a été émis l'hypothèse que ce métabolisme réduit était également le reflet d'une adaptation aux basses teneurs en oxygène des eaux souterraines. Un hypométabolisme se traduit par une demande en oxygène plus faible et donc par une augmentation de la survie en anoxie (Hervant et Renault, 2002).
- ❖ Adaptations à l'absence de nourriture : Lors d'un jeûne de longue durée, on observe chez les crustacés épigés *Niphargus rhenorhodanensis* et *Niphargus virei* une utilisation séquentielle des réserves énergétiques, avec un catabolisme à dominance glucidique durant les premiers jours de jeûne qui ne représente que 5 % de l'alimentation en énergie durant une période de 180 jours de jeûne, puis lipidique représentant 51 % de l'énergie consommée durant cette même période et enfin protéino-lipidique représentant 44 % de l'énergie mobilisée durant la dernière phase du jeûne (Hervant *et al.*, 1999; 2001). La meilleure survie au jeûne alimentaire observée chez ces organismes a également été reliée à des réserves énergétiques plus importantes telles que l'arginine phosphate, les triglycérides, le glycogène, et un taux d'utilisation des métabolites beaucoup plus bas que chez des espèces épigées morphologiquement proches, permettant d'alimenter en énergie l'organisme pendant une plus longue période de jeûne.

I.5.4. Rôle de la faune aquatique souterraine

Par leur place dans les aquifères, les animaux souterrains agissent sur la dégradation de la matière organique véhiculée par l'eau. Par respiration et excrétion, ils agissent sur la composition physico-chimique de l'eau. Ce sont également des descripteurs de la structure et du fonctionnement des aquifères (Creuzé des Châtelliers et Dole-Olivier., 1991).

La faune souterraine est capable de métaboliser et de transformer certains polluants en produits non toxiques (Sinton, 1984). Cet auteur estime que les Crustacés hypogés qui se trouvent dans un puits d'une station d'épuration pourraient recycler jusqu'à 20% de la matière organique provenant des eaux usées via les eaux souterraines.

L'effectif des micro-organismes tels que les bactéries, les diatomées, les protozoaires et les champignons est en général très faible à cause de l'action épuratrice du sol, laquelle est aussi efficace vis-à-vis des particules en suspension (Nola *et al.*, 2005). L'abondance des bactéries dans les eaux souterraines est à la fois tributaire des conditions physico-chimiques et trophiques locales, de la température et de la perméabilité de l'aquifère (Holt *et al.*, 2000). Boutin (1984), Boulanouar (1986, 1995) et Boulal *et al.* (1997) ont montré que certains animaux phréatobies (*Typhlocirolana*, *Marocolana*) peuvent être considérés comme indicateurs de la qualité de l'eau car ils ne se retrouvent que dans les eaux de bonnes qualités caractérisées par des faibles valeurs des paramètres physico-chimiques. Afonso (1987) a mis en évidence une relation entre les Asellides et certaines caractéristiques du milieu interstitiel. Cet auteur relève ainsi que la connaissance de la faune aquatique souterraine indicatrice de la qualité de l'eau présente un intérêt certain. Elle permet de rechercher une corrélation entre la faune hypogée et le fonctionnement de l'hydrosystème considéré. En outre, elle vient en complément des analyses physicochimiques et bactériologiques et peut renseigner sur les pollutions accidentelles non détectées par les analyses chimiques faites sur un ou quelques prélèvements ponctuels.

La faune aquatique souterraine est également utilisée comme traceur paléogéographique pour la datation des couches de terrains et dans la compréhension des mouvements de transgressions marines (Boutin, 1994). L'endémisme qui caractérise cette faune en fait des espèces rares. En effet, lorsqu'une ou plusieurs espèces sont dites endémiques à un milieu relativement étroit, ce milieu devient une priorité en terme de conservation puisque la préserver signifie préserver les espèces qui ne peuvent être trouvées nulle part dans le monde (Birdlife International/COC, 1999).

Cette faune offre d'importantes perspectives de valorisation dans le domaine de la biotechnologie, notamment pour les micro-organismes, mais également dans le domaine des manipulations génétiques.

I.6. Pollution des eaux souterraines

La pollution peut être définie comme toute modification défavorable du milieu naturel, qui apparait en totalité ou en partie comme un sous-produit de l'action humaine, à travers des faits directs et indirects, altérant les modalités de répartition des flux d'énergie (Ramade, 2002). Il s'agit également de rejets des substances chimiques et radioactives qui rendent l'environnement malsain (Robert, 1987).

Les causes et les mécanismes de la pollution de l'eau d'un puits, d'une source ou d'une nappe souterraine dans son ensemble peuvent être multiples (Boutin et Dias, 1986).

Généralement, la contamination des eaux souterraines est d'origine agricole, industrielle et domestique (Guillemin et Roux, 1992 ; Chippaux *et al.*, 2002). La **figure 3** présente quelques mécanismes de contamination des eaux souterraines.

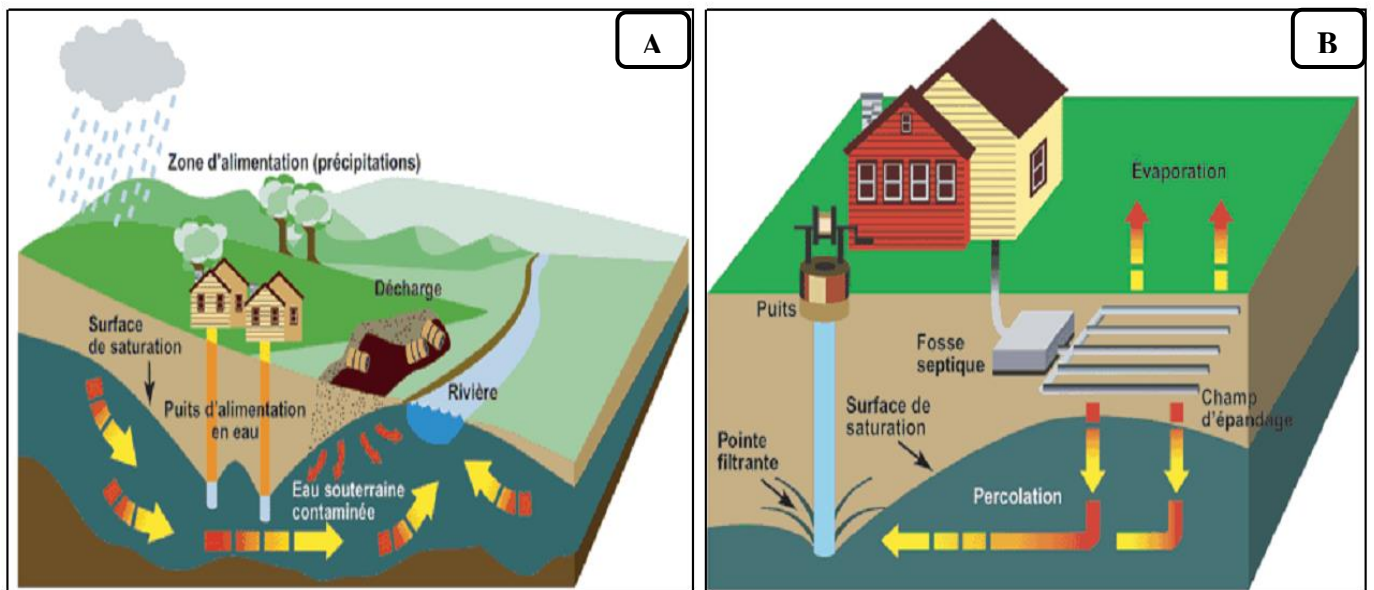


Figure 3 : Mécanismes de contamination des eaux souterraines, A= Contamination des eaux souterraines par une décharge, B=Percolation de l'effluent de la fosse septique jusqu'à la surface de saturation. (Cherry John A., 1987)

Les pesticides, les engrais et autres herbicides sont des sources agricoles de contamination des eaux souterraines. Les eaux de ruissellement chargées de résidus de ces produits peuvent s'infiltrer.

Les fosses utilisées pour l'évacuation des eaux domestiques usées (systèmes de fosses septiques, des puisards, des puits de drainage pour l'écoulement de précipitations exceptionnelles, systèmes d'égouts mal entretenus) contribueraient à la contamination des eaux souterraines (Chippaux *et al.*, 2002). Le stockage et/ou l'évacuation de produits chimiques ménagers, de même que les déchets enterrés peuvent souiller les sols, et s'écouler dans les eaux souterraines (Guillemin et Roux, 1992).

La nappe phréatique est d'autant plus vulnérable que son toit est proche de la surface du sol, et que les sources superficielles de pollutions sont importantes (El Yamine, 1978). Les eaux souterraines circulent lentement dans le sol, si bien que l'incidence des activités humaines peut se faire sentir pendant un temps relativement long. C'est pourquoi il est nécessaire de chercher avant tout à prévenir la pollution (Degrémont, 2005).

Les facteurs qui jouent sur la pollution des eaux souterraines et qui permettent en conséquence un contrôle naturel sont la texture du sol et la teneur élevée en argile. En effet, la

texture fine atténue le risque de pollution des eaux souterraines par rapport à la texture grossière à cause d'une plus grande capacité de rétention en eau et l'effet retard des phénomènes de percolation favorisés par la microporosité du sol (Cosserate *et al.*, 1990 ; Pixie et Dennis, 1995).

Selon une étude menée par OSEED (2005), la ville de Douala regorge un peu plus de 5500 entreprises exerçant dans divers domaines d'activité, du secteur primaire au secteur tertiaire en passant par le secteur secondaire. Dans cette métropole économique, les secteurs primaire et secondaire regroupent près de 230 et 340 entreprises industrielles respectivement, et représentent 75,43% de grandes entreprises du Cameroun (OSEED, 2005). Ces industries toutes génératrices de nuisances et pour la plupart non compatibles avec l'habitat, sont aujourd'hui implantées dans le tissu urbain. Les rejets industriels sont essentiellement déversés dans le milieu naturel sans aucun traitement préalable. Selon la Communauté Urbaine de Douala, il n'existe à ce jour aucune unité de traitement des déchets industriels dans cette ville, et des cas de déversements abusifs d'effluents et de déchets industriels solides sont quotidiennement déplorés (**Figure 4**). Pourtant, ces rejets industriels sont très souvent chargés de polluants halogénés classés comme Polluants Organiques Persistants (POP). Ces derniers se caractérisent par leur forte toxicité, leur persistance dans l'environnement et leur bioaccumulation dans les organismes, due pour la plupart, à leur caractère lipophile (Villanueva, 2004). Bon nombre de POP sont également reconnus pour leur propriété cancérogène (Bodin, 2005). Outre ces polluants halogènes, les déchets industriels sont généralement riches en métaux lourds qui, sous diverses formes chimiques, parviennent directement dans l'eau ou indirectement par leur propagation dans l'atmosphère pour rejoindre le cycle hydraulique et/ou le réseau trophique (Revathi *et al.*, 2013). Ils peuvent ainsi se retrouver en solution à l'état de complexes minéraux ou organiques, sous forme colloïdale, hydroxydes particulaires et oxydes insolubles, ou simplement bioaccumulés ou séquestrés dans les sédiments (Kourradi *et al.*, 2005 ; Revathi *et al.*, 2013). Ces pollutions exposent les organismes biologiques à la modification de leur métabolisme, leur comportement écologique et mettent leur vie en danger (Entsua-Mensah, 2002 ; Guyonnet *et al.*, 2003), pouvant ainsi endommager la structure, l'organisation et le fonctionnement de l'écosystème tout entier (Scharler & Baird, 2003 ; Revathi *et al.*, 2013)



Figure 4 : Quelques vues sur la pollution industrielle des eaux dans la ville de Douala. A = Rejets combinés de Socaver, Sicam et Guinness ; B et C = Rejets de la savonnerie SANET ; D et E = Rejets de l'entreprise brassicole SABC ; F= Rejets de l'entreprise agroalimentaire SIC CACAOS.

CHAPITRE II :
ZONE D'ETUDE, MATERIEL ET
METHODES

II.1. Zone d'étude

II.1.1. Description générale

La ville de Douala, capitale économique du Cameroun, est située en zone tropicale humide, au fond du Golfe de Guinée, le long de l'estuaire du fleuve Wouri. D'une superficie d'environ 38700 ha, cette ville s'étend entre 03°58' et 04°07' de Latitude Nord, et entre 09°34' et 09°49' de Longitude Est (CUD, 2011 ; INS, 2021).

II.1.1.1. Hydrographie

La ville est constituée d'un réseau hydrographique relativement dense. On dénombre environ 827 km de drains naturels. Elle compte 9 bassins hydrologiques (Bonassama, Besséké, Bobongo, Mgoua, Kambo, Nsapé, Mbopi, Mbanya et Tongo bassa) qui se jettent tous dans le Wouri. Le Wouri, principal fleuve de la ville prend sa source dans les hauts plateaux de l'Ouest-Cameroun ; il traverse la ville avant de se jeter dans l'océan Atlantique. La ville est encadrée de part et d'autre par les fleuves Sanaga, Dibamba, Moungo et Nyong (INS, 2021). Dans l'ensemble, ces cours d'eau sont formés en méandres qui ont tendances à ralentir l'écoulement des rivières et à stagner. L'estuaire du Wouri est régulièrement envahi par les eaux marines et comporte de nombreuses criques, des mangroves et de nombreuses zones marécageuses qui très souvent encerclent de rares petites zones à peine aménageables envahies par la ville (CUD, 2011).

II.1.1.2. Relief

La ville entière s'étale dans une zone de plaine dont l'altitude varie de 0 à 12 m avec de faibles pentes (2,9% à 6,45%) interrompues par de bas plateaux (Joss, Akwa, Bonapriso) dont les altitudes oscillent entre 20 et 60 mètres (Cluva, 2012). Les faibles pentes limitent la vitesse des écoulements et favorisent la stagnation et l'infiltration des eaux de pluie. On distingue les zones de basses terres et les zones de légers bombements. Les basses terres sont constituées d'alluvions plus ou moins bien consolidées avec une bonne aptitude de rétention de l'eau. Toutes ces conditions facilitent la mise en place des marécages. Les plateaux et les collines sédimentaires sont formés d'alluvions consolidées coupées de vallées constituées d'alluvions mal consolidées (CUD, 2011).

II.1.1.3. Pluviométrie

En raison de la proximité de l'océan Atlantique et des influences directes et régulières de la mousson guinéenne, Douala et ses environs présentent de fortes averses presque toute l'année (Suchel, 1972) ; avec une légère baisse de novembre à février (**Figure 5**). La hauteur moyenne annuelle des précipitations est de 4 000 mm correspondant à une pluie journalière

moyenne de près de 150 mm sur 217 jours en moyenne (Zogning *et al.*, 2015). Ces précipitations s'étalent sur une longue saison de pluie qui va de mars à novembre, les mois les plus pluvieux (juillet et août) pouvant cumuler jusqu'à 1500 mm de précipitation (Tchadeu et Ketchemen, 2009). On observe une certaine régularité des pluies en quelques séquences d'averses successives qui saturent les nappes souterraines et les strates rocheuses. Les inondations peuvent résulter soit de précipitations courtes mais intenses (en une seule séquence d'un jour) soit de précipitations durables (une séquence de plusieurs jours de pluie). C'est cette répartition temporelle qui est à l'origine des pluies tous les mois de l'année. Pendant ces mois les événements pluvieux sont inégalement répartis et parfois très rapprochés.

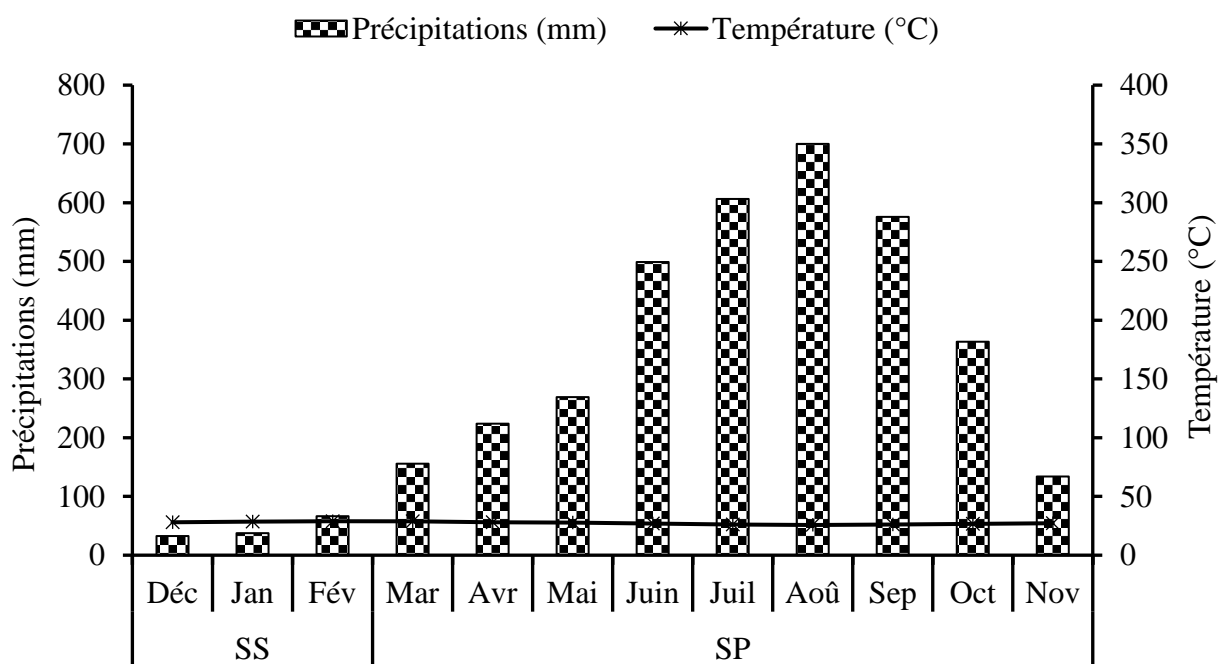


Figure 5 : Diagramme ombrothermique présentant les variations mensuelles des valeurs moyennes de précipitations et de température enregistrées de janvier 1998 à décembre 2013 dans la ville de Douala : SS = Saison sèche et SP = Saison pluvieuse (Tchakonté, 2016).

II.1.1.4. Caractéristiques des sols

La ville de Douala est constituée de deux types de sols : sablo - argileux et argilo – sableux aux caractéristiques topographiques différentes (INS, 2015 ; 2021). Ces sols varient en fonction de leur aptitude à l'assainissement (CUD, 2009). Dans les formations sablo-argileuses, favorables à l'assainissement, le niveau d'eau au sol varie entre 2 et 5 m, la profondeur du substratum se situe entre 1 et 2 m, la perméabilité au sol est de l'ordre de 1 à 3 cm/heure. Les formations argilo-sableuses par contre ne présentent aucune aptitude à l'assainissement, le niveau d'eau au sol est inférieur à 1 m et la perméabilité à 1 cm/heure. De plus, la nappe

phréatique est très peu profonde et même parfois affleurante et la capacité d'infiltration des eaux de pluie est très limitée. Ainsi, pendant la saison des pluies les sols sous l'influence de fortes pluies très rapprochées atteignent rapidement leur niveau de « saturation » ce qui entraîne le gonflement de la nappe phréatique qui renvoie rapidement l'eau en surface d'où les inondations fréquentes. C'est généralement dans cette zone qu'on enregistre les grandes hauteurs d'eaux et les plus longues durées de submersion.

II.1.1.5. Démographie

La ville de Douala a connu depuis l'époque coloniale une croissance démographique qui s'est amplifiée après les indépendances (Mbaha *et al.*, 2013; Nsegbe *et al.*, 2014). En 1976, la population de Douala étant estimée à près de 458 400 habitants (Gubry *et al.*, 1983). Elle passera ensuite à 1 907 479 habitants en 2005 (RGPH) avec un taux de croissance de 4,87% (1987-2005). En 2005, elle concentre environ 10,92 % de la population urbaine camerounaise contre 6.9% en 1976 (Nsegbe *et al.*, 2014). En 2010, la population de Douala est estimée à 2,5 millions d'habitants (BUCREP, 2010, CUD, 2011) et les projections indiquent que Douala comptera en 2025, entre 1,3 et 1,6 millions d'habitants supplémentaires, soit près de 4 millions. Considérant qu'une partie de cette population va s'installer dans les zones déjà urbanisées, et encore peu denses, il est possible de considérer qu'environ 11 000 hectares seront nécessaires pour accueillir les autres (CUD, 2011). La ville concentre environ 10 % de la population du Cameroun et près de 20 % de la population est urbaine (CUD, 2011), avec un taux annuel moyen de croissance démographique estimé à 5% sur les 30 dernières années. Ce taux est largement au-dessus du taux national estimé à 2,8% et la population de Douala pourrait tripler à l'horizon 2035 (INS, 2015).

II.1.2. Choix et description des sites d'étude

L'étude s'est réalisée dans cinq (05) sites à savoir la zone périurbaine de PK 21, les zones urbaines de Ndogbong et Cité SIC, et les Zones Industrielle de Bassa (ZIBA) et de Bonabéri (ZIBO) (**Figure 6**)

Le choix des stations d'étude s'est fait suivant plusieurs critères dont le plus importants ont été :

- l'absence d'industries et une faible densité de la population pour la zone périurbaine ;
- la présence des rejets industriels et urbains et une forte densité de la population pour les sites de la zone urbaine industrialisée ;
- la disponibilité des puits et leur accessibilité dans les grandes zones industrielles.

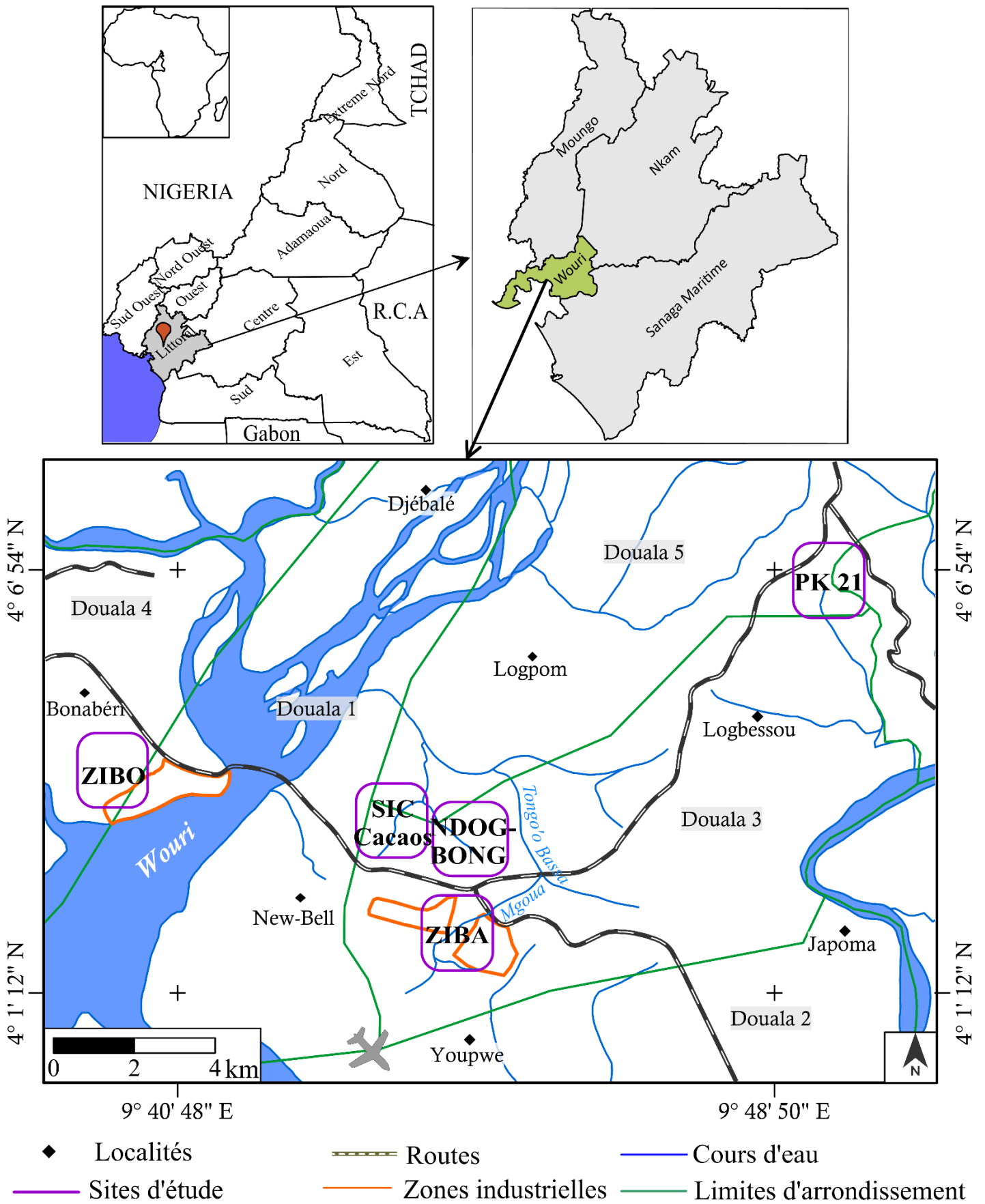


Figure 6 : Localisation des différents sites d'étude (Source : CUD, 2007, modifié)

II.1.2.1. Site de PK 21 et ses stations

Le site de Douala PK 21 est considéré dans cette étude comme le site témoin en raison de l'absence d'industrie et une faible densité de la population ; ce qui implique l'absence d'une pollution industrielle et des faibles rejets domestiques. Au total, dix (10) puits ont été choisis, codifiés PKP1 à PKP10 (**Tableau V**). Plus profonds (6-9m) que le reste des puits retenus pour cette étude, les puits de PK 21 (**Figures 7 et 8**) présentent des margelles plus ou moins hautes et couverts à 60% (6 puits sur les 10). En raison de l'absence d'un réseau d'adduction d'eau potable dans cette zone, les eaux de ces puits sont utilisées pour la consommation et font l'objet de traitement par l'ajout du chlore et du sel par les propriétaires (quantité et fréquence de traitement non déterminées).

Tableau V : Caractéristiques des puits échantillonnés de la zone périurbaine de PK 21 (Alt = altitude, HM = Hauteur de la margelle et Prof = Profondeur).

Stations	Coordonnées géographiques	Alt (m)	HM (cm)	Prof (m)	Couvercle
PKP1	N 04°07'26,8" et E 09°49'36,7"	59	30	9	Présent
PKP2	N 04°07'26,7" et E 09°49'37,4"	55	43	8,2	Présent
PKP3	N 04°07'17,2" et E 09°49'42"	63	47	8,3	Absent
PKP4	N 04°07'16" et E 09°49'41,4"	62	135	7,7	Présent
PKP5	N 04°07'14,5" et E 09°49'38,2"	58	85	7,8	Absent
PKP6	N 04°07'14,3" et E 09°49'33,7"	53	100	7,6	Absent
PKP7	N 04°07'10,3" et E 09°49'35,3"	51	100	6,8	Présent
PKP8	N 04°07'08,6" et E 09°49'35,5"	61	60	8	Absent
PKP9	N 04°07'07,6" et E 09°49'37,6"	50	120	6	Présent
PKP10	N 04°07'08,7" et E 09°49'33,3"	48	105	6	Présent

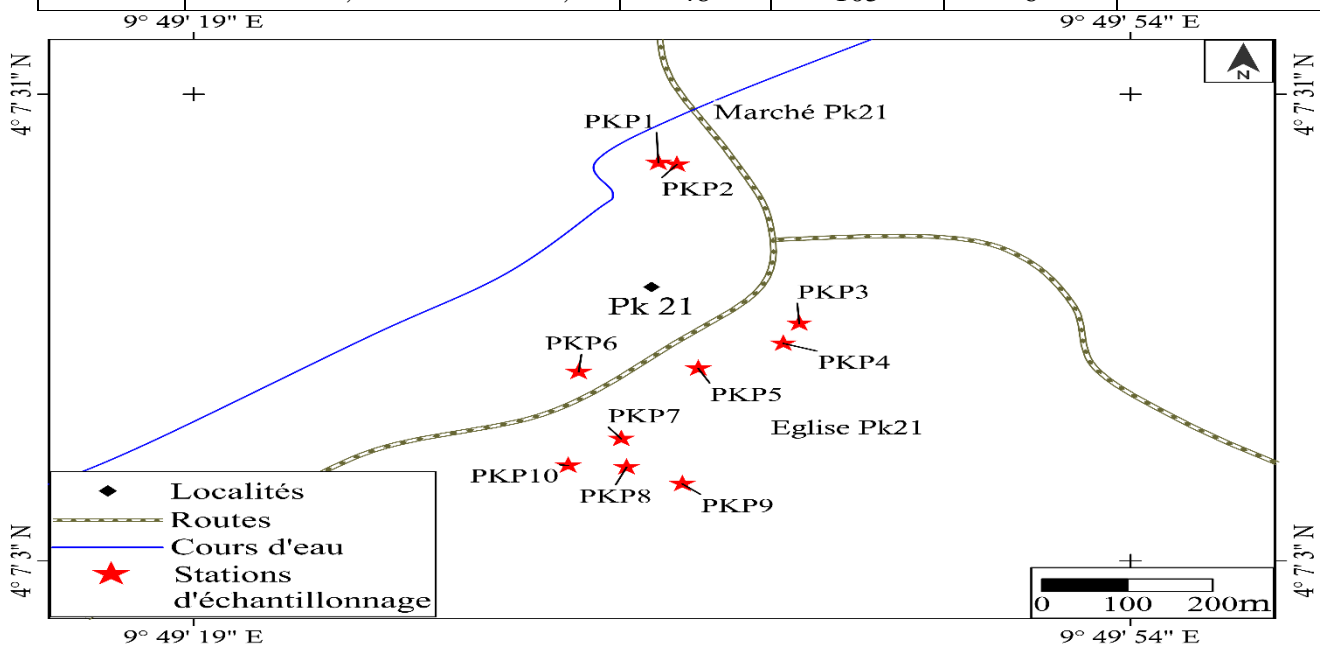
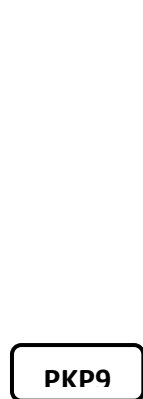
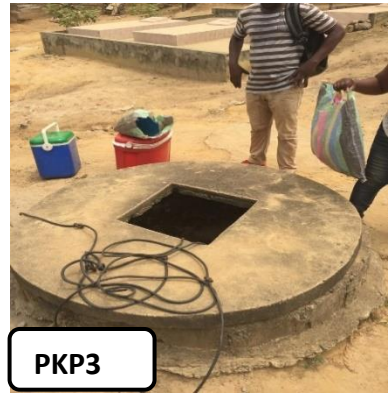


Figure 7 : Localisation des stations d'échantillonnage de la zone périurbaine de PK 21



PKP10



Figure 8 : Images des puits de la zone périurbaine de PK21

II.1.2.2. Site de Ndogbong et ses stations

Le site de Ndogbong est situé dans le bassin versant de Tongo'a-Bassa, situé en plein centre urbain, précisément dans l'arrondissement de Douala V. Dans ce bassin versant, on note une forte urbanisation anarchique et la population y est densément installée, avec une densité pouvant dépasser 200 habitants à l'hectare dans certains sous-quartiers (Tchuikoua, 2010). Plusieurs grandes industries y sont implantées, notamment la Société GUINNESS (fabrication de la bière), la SOCAVER (fabrication des verres), la CICAM (industrie textile), la CAMLAIT (fabrication des produits laitiers). Ces industries déversent continuellement leurs rejets dans le cours d'eau Tongo'a-Bassa. Trois (03) puits ont été retenus à l'aval du lieu de déversement des rejets industriels, codifiés NDOGP1, NDOGP2 situés à 3 m et 8 m respectivement sur la berge gauche du cours d'eau Tongo'a-Bassa et NDOGP3 situé à 10 m sur la berge droite de ce cours d'eau (**Figure 11**). Ces puits sont très peu profonds (< 3 m) et situés à proximité des habitations (**Tableau VI**). Seul NDOG P1 présente un couvercle qui est une vieille tôle rouillée (**Figure 9**).

Tableau VI : Caractéristiques des puits échantillonnés de la zone de Ndogbong (Alt = altitude, HM = Hauteur de la margelle et Prof = Profondeur).

Stations	Coordonnées géographiques	Alt (m)	HM (cm)	Prof (m)	Couvercle
----------	---------------------------	---------	---------	----------	-----------

NDOGP1	N 04°03'09" et E 09°44'39,8"	31	50	2,4	Présent
NDOGP2	N 04°03'10,2" et E 09°44'36"	20	60	1,8	Absent
NDOGP3	N 04°03'13,7" et E 09°44'34,2"	19	40	2,2	Absent



Figure 9 : Images des puits du site de Ndogbong

II.1.2.3. Site de Cité SIC et ses stations

Le site de Cité SIC est également situé dans l'arrondissement de Douala V. La plus connue des industries implantées dans cette zone est SIC CACAOS qui est spécialisée dans la chocolaterie et la confiserie dont l'effluent se déverse directement dans l'affluent Tongo'a-Bassa. Trois puits, codifiés SICP1, SICP2 et SICP3, y sont retenus présentant une faible profondeur (≤ 2 m) et des margelles très basses ($< 0,35$ m) (**Tableau VII**). Les stations SICP2 et SICP3 présentent un couvercle en bois (**Figure 10**).

Tableau VII: Caractéristiques des puits échantillonnés de la zone de la Cité SIC (Alt = altitude, HM = Hauteur de la margelle et Prof = Profondeur).

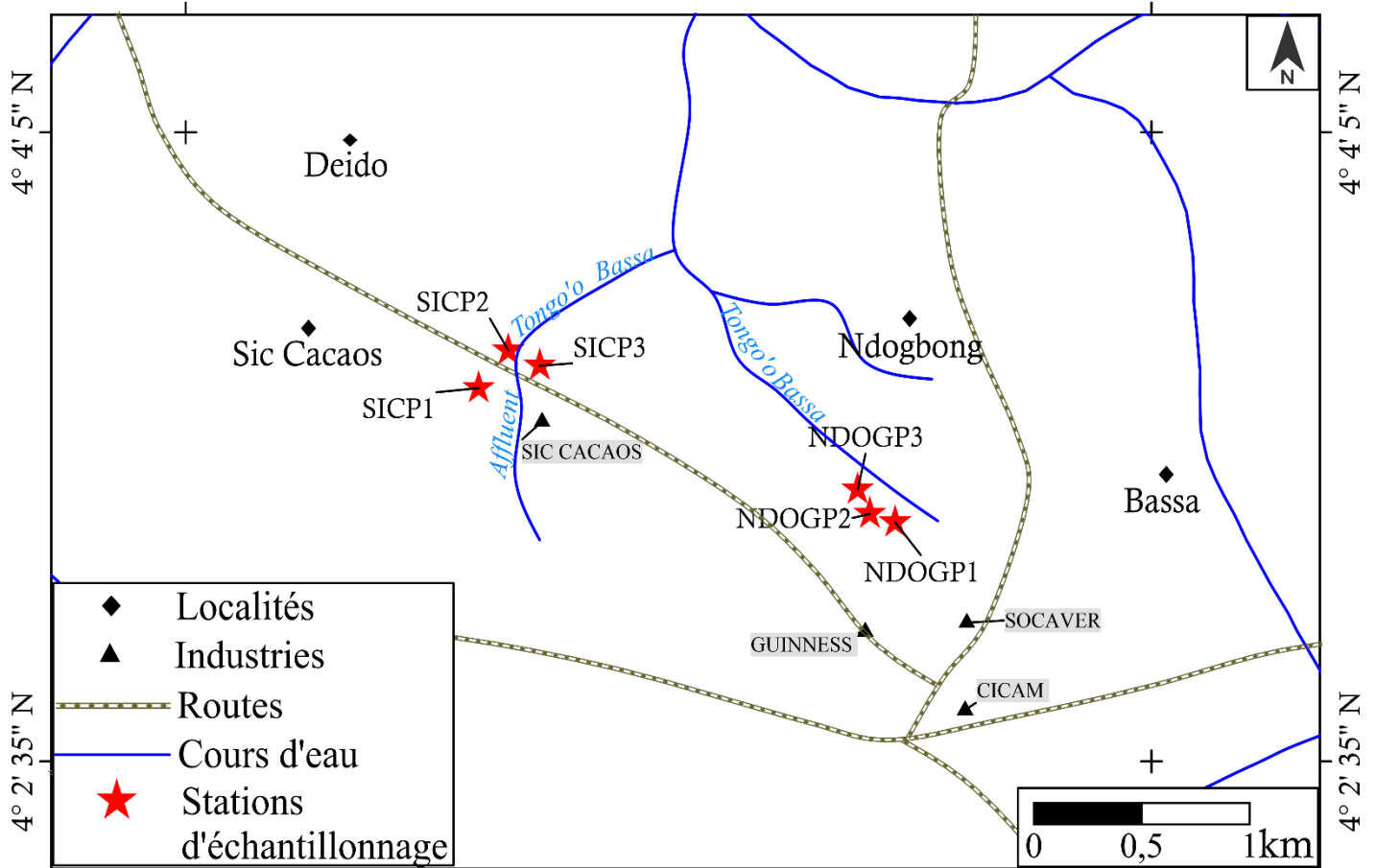
Stations	Coordonnées géographiques	Alt (m)	HM (cm)	Prof (m)	Couvercle
SICP1	N 04°03'28,2" et E 09°43'37,7"	14	16	2	Absent
SICP2	N 04°03'33,6" et E 09°43'42,1"	7	34	0,5	Présent
SICP3	N 04°03'31,4" et E 09°43'46,8"	8	24	1,8	Présent



Figure 10 : Images des puits du site de Cité SIC

9° 42' 54" E

9° 45' 18" E



9° 42' 54" E

9° 45' 18" E

Figure 11 : Localisation des stations d'échantillonnage des sites de Ndogbong et de Cité SIC

II.1.2.4. Site de la Zone Industrielle de Bassa (ZIBA) et ses stations

La zone industrielle de Bassa (ZIBA) est située dans le 3^{ème} arrondissement et occupe une superficie totale de 150 ha (MADZI, 2020). C'est la zone où se concentre l'essentiel des activités industrielles du littoral camerounais (Tchakonté, 2016). Environ 126 industries y sont implantées, principalement ALUBASSA, CEP, CMC, CTE, CAMOA, CCC, CHOCOCAM,

NETOYCAM, PANZANI, LA PASTA, PILCAM, PLASTICAM, SCTB, SCIMPOS, SIPCA, SMALTO, SOCARTO, UCB, SABC, UNALOR, CCIC, UCPHARM entre autres (MADZI, 2020). Dans cette zone, quinze (15) stations, codifiées ZIBAP1 à ZIBAP15, ont été choisies de part et d'autre du cours d'eau Mgoua et ses affluents. Ces puits sont très peu profonds (0,7 - 4,2 m) (**Tableau VIII**), non couverts pour la plus part, avec des margelles plus ou moins hautes dont certaines sont faites d'une superposition des vieux pneus (**Figure 13**).

Tableau VIII : Caractéristiques des puits échantillonnés de la zone industrielle de Douala Bassa (ZIBA) (Alt = altitude, HM = Hauteur de la margelle et Prof = Profondeur).

Stations	Coordonnées géographiques	Alt (m)	HM (cm)	Prof (m)	Couvercle
ZIBAP1	N 04°01'59,2" et E 09°44'30,8"	16	11	0,7	Absent
ZIBAP2	N 04°01'58" et E 09°44'29,4"	17	86	1,4	Absent
ZIBAP3	N 04°01'56,9" et E 09°44'27,5"	14	70	1	Absent
ZIBAP4	N 04°01'54,8" et E 09°44'28,5"	24	80	3,2	Absent
ZIBAP5	N 04°01'53,1" et E 09°44'25,7"	13	87	2,35	Absent
ZIBAP6	N 04°01'51" et E 09°44'22,7"	19	100	2,75	Absent
ZIBAP7	N 04°01'48,2" et E 09°44'20,6"	18	66	3,5	Absent
ZIBAP8	N 04°01'43,1" et E 09°44'09,9"	12	73	2,7	Absent
ZIBAP9	N 04°01'42,5" et E 09°44'13"	25	42	3,5	Présent
ZIBAP10	N 04°01'35,4" et E 09°44'18,2"	19	42	2,9	Absent
ZIBAP11	N 04°01'35,9" et E 09°44'19,9"	28	38	3,2	Absent
ZIBAP12	N 04°01'36,8" et E 09°44'19,8"	22	44	4,2	Présent
ZIBAP13	N 04°01'36,3" et E 09°44'20,6"	12	90	2,8	Absent
ZIBAP14	N 04°01'37,7" et E 09°44'21,1"	21	40	1,6	Absent
ZIBAP15	N 04°01'42,1" et E 09°44'24"	18	60	3	Présent

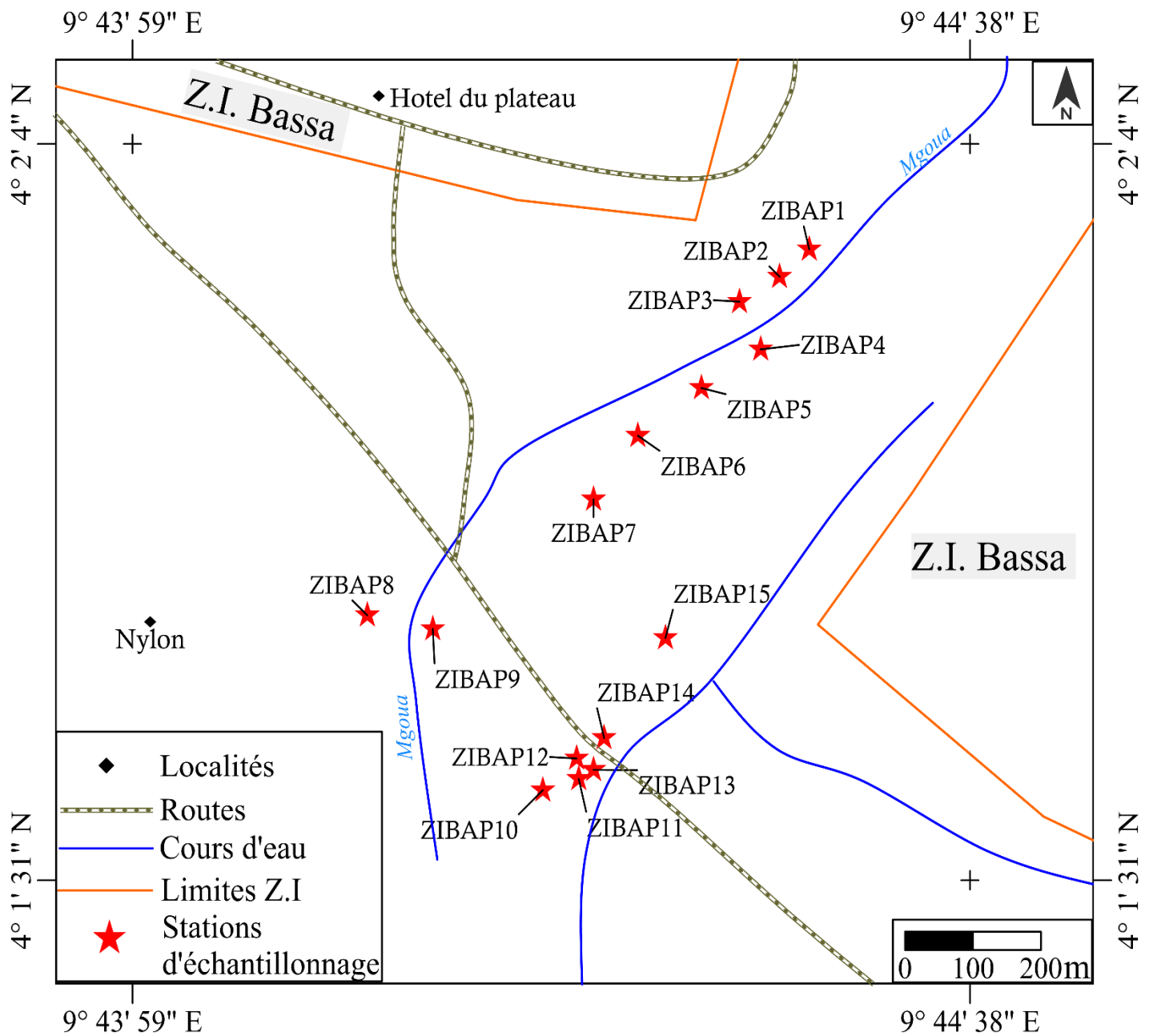


Figure 12 : Localisation des stations d'échantillonnage de la zone industrielle de Bassa (ZIBA)



Figure 13 : Images des puits industriels de la zone industrielle de Bassa (ZIBA)

II.1.2.4. Site de la Zone Industrielle de Bonabéri (ZIBO) et ses stations

La zone industrielle de Bonabéri (ZIBO) est située dans l'arrondissement de Douala IV, plus précisément, à la pointe de Bonabéri sur les berges du fleuve Wouri (MAGZI, 2020). Cette zone industrielle occupe une superficie totale de 192 ha et compte environ 70 industries installées, principalement CIMAF CAMEROUN, SOTICAM, CIMENCAM, COMETAL, PLASTCAM, SC2R-RECYCLAGE, PAINTCAM INDUSTRIES, CIL (MAGZI, 2020).

Au total, dix (10) puits, codifiés ZIBOP1 à ZIBOP10, ont été choisis (**Figure 14** et **15**). Ces puits sont peu profonds (0,8-2,9 m) non couverts pour la plus part (70%) avec des margelles plus ou moins hautes (**Tableau IX**).

Tableau IX : Caractéristiques des puits échantillonnés de la zone industrielle de Douala Bonabéri (ZIBO) (Alt = altitude, HM = Hauteur de la margelle et Prof = Profondeur).

Stations	Coordonnées géographiques	Alt (m)	HM (cm)	Prof (m)	Couvercle
ZIBOP1	N 04°04'17,6" et E 09°40'29,4"	15	65	2,1	Absent
ZIBOP2	N 04°04'18,1" et E 09°40'29,2"	8	100	2,3	Présent
ZIBOP3	N 04°04'18,4" et E 09°40'28,8"	9	50	2,9	Présent
ZIBOP4	N 04°04'16,7" et E 09°40'25,4"	12	82	1,3	Présent
ZIBOP5	N 04°04'11,2" et E 09°40'07,3"	10	30	3	Absent
ZIBOP6	N 04°04'03,4" et E 09°40'07,5"	9	90	1,7	Absent
ZIBOP7	N 04°04'02,7" et E 09°40'04,8"	8	70	0,8	Absent
ZIBOP8	N 04°04'08,5" et E 09°40'05,4"	5	34	1,8	Absent
ZIBOP9	N 04°04'11,5" et E 09°40'01,6"	7	70	2,1	Absent
ZIBOP10	N 04°04'11,9" et E 09°40'01,4"	7	70	2,4	Absent

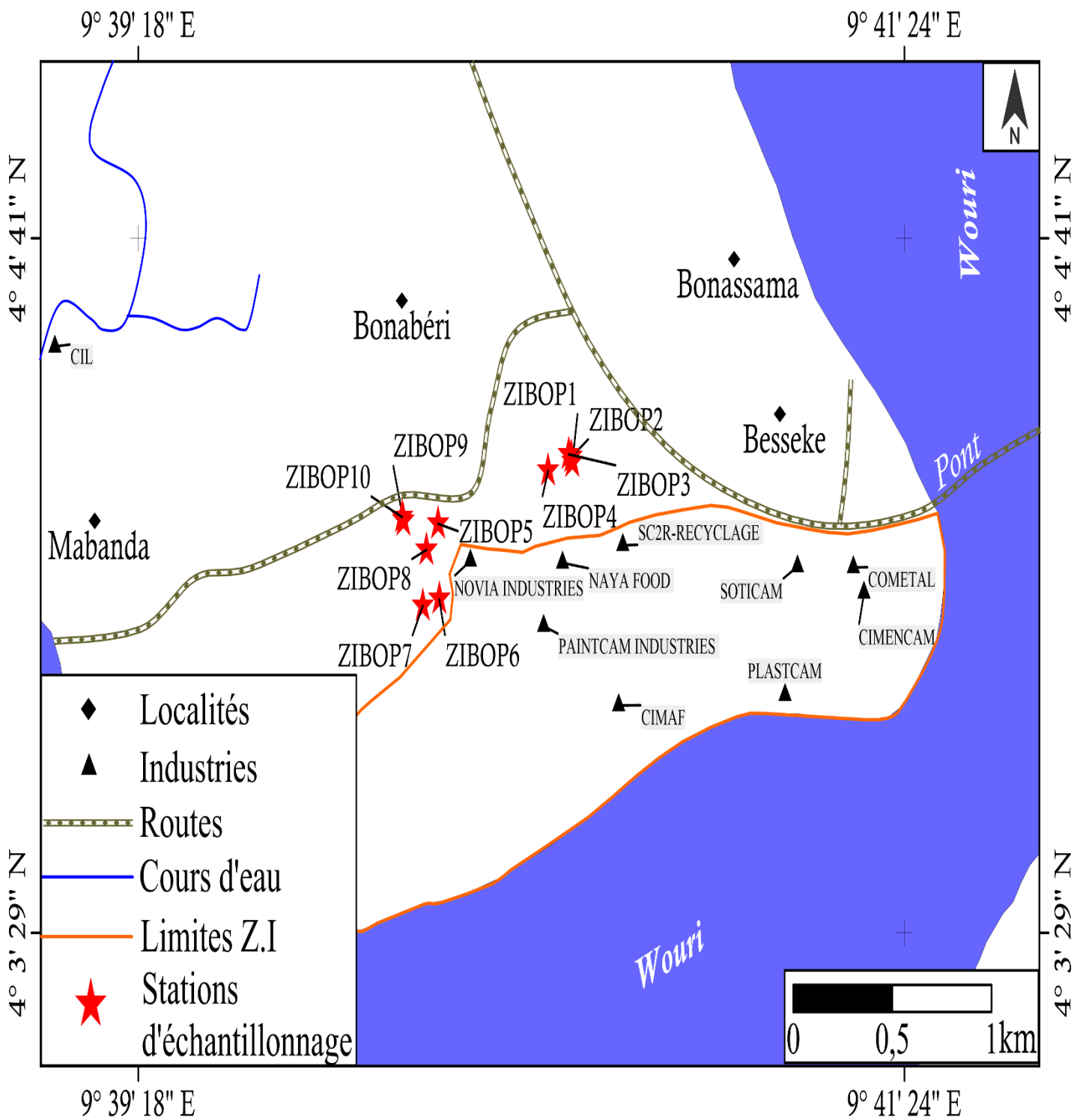


Figure 14 : Localisation des stations d'échantillonnage de la zone industrielle de Bonabéri (ZIBO)



ZIBO P1



ZIBO P2

ZIBO



ZIBO



ZIBO P5

ZIBO



ZIBO P7



ZIBO P8



ZIBO P9



Figure 15 : Images des puits d'eau de la zone industrielle de Bonabéri (ZIBO)

II.2. Matériel et méthodes

L'étude s'est déroulée en trois phases : une phase préliminaire allant de novembre 2018 à février 2019 consacrée à la rencontre avec les autorités, la prospection des sites et au choix des stations d'échantillonnage. La seconde phase s'est déroulée de juin 2019 à février 2020 et a consisté à la collecte des données physicochimiques et biologiques dans les 41 puits retenus. Cette seconde phase s'est faite en quatre (04) campagnes dont deux (02) en saison de pluie (juin et septembre 2019) et deux (02) autres en saison sèche (décembre 2019 et février 2020). Les concentrations en Eléments Traces Métalliques (ETM) dans l'eau et les sédiments ont été déterminées deux fois, respectivement pendant la saison de pluie (juin 2019) et durant la saison sèche (février 2020). Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) ont quant à eux été mesurés une seule fois dans les sédiments pendant la saison de pluie (juin 2019). La troisième phase s'est déroulée quant à elle de janvier en avril 2021 au Laboratoire d'Hydrobiologie et Environnement de l'Université de Yaoundé I et de mai à septembre 2021 au Laboratoire Ecologie, Biodiversité et Evolution de l'Université de Rennes 1 en France. Elle a consisté aux analyses morphologiques et biomoléculaires de la faune stygobie recensée.

II.2.1. Mesure des paramètres hydromorphométriques et géographiques des stations

La hauteur de la margelle et la profondeur des puits ont été mesurés à l'aide d'un décimètre et d'un filet gradué, les coordonnées géographiques et l'altitude de chaque puits ont été obtenues à l'aide d'un GPS 60 de marque Garmin pendant la phase de prospection. La couche d'eau quant à elle a été mesurée à chaque campagne à l'aide d'un filet gradué.

II.2.2. Mesure des paramètres physicochimiques

Les mesures des paramètres physicochimiques se sont déroulées à la fois sur le terrain et au laboratoire suivant les recommandations de APHA (1998) et Rodier *et al.* (2009). Les mesures et les prélèvements d'eau ont été réalisées avant l'échantillonnage de la faune pour éviter toute perturbation du milieu susceptible de biaiser les résultats suivant le protocole décrit par le guide Pascalis (2009).

II.2.2.1. Mesures *in situ*

La température de l'eau (°C), le pH (UC), la salinité (ppm), la conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$), les solides totaux dissous (TDS en ppm) et le taux de saturation en oxygène dissous (% de saturation) ont été mesurés *in situ*, respectivement à l'aide d'un multiparamètre de marque LAQUA HORIBA PC 220 et d'un oxymètre de marque HACH HQ14d. Pour ce faire, les appareils de mesures préalablement calibrés ont été mis sous tension, leurs sondes ont été ensuite plongées dans l'eau et la sélection de la fonction du paramètre désiré a permis d'obtenir la valeur de celui-ci sur l'écran d'affichage.

Pour la mesure du CO_2 dissous, 200 mL d'échantillon ont été fixés sur le terrain au moyen d'une solution de soude (NaOH) N/20 en utilisant la phénolphthaléine comme indicateur coloré.

II.2.2.2. Mesures au laboratoire

Pour les paramètres physicochimiques mesurés au laboratoire (MES, turbidité, couleur, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , alcalinité, oxydabilité, duretés calcique et magnésienne, DCO, DBO_5), les échantillons d'eau ont été prélevés sans faire de bulles, à chaque station et à chaque campagne à l'aide des flacons en polyéthylène à double bouchage de 250 et 1000 mL et transportés en enceinte réfrigérée (environ 4°C) jusqu'au laboratoire.

II.2.2.2.1. Matières En Suspension (M.E.S), Turbidité et Couleur

Les MES, la Turbidité et la Couleur de l'eau ont été mesurées par colorimétrie au spectrophotomètre HACH DR 2800, aux longueurs d'onde $\lambda = 810 \text{ nm}$, $\lambda = 450 \text{ nm}$ et $\lambda = 455 \text{ nm}$ respectivement. Les valeurs ont été exprimées en mg/L, en FTU et en Pt-Co respectivement.

II.2.2.2.2. Gaz carbonique dissous (CO_2)

Le CO_2 dissous a été mesuré par la méthode volumétrique. Les échantillons fixés sur le terrain ont été titrés en utilisant le HCl N/10. Les résultats, exprimés en mg.L^{-1} de CO_2 , sont obtenus avec la formule :

$$\text{Volume CO}_2 = (\text{descente burette témoin} - \text{descente burette échantillon}) \times 17,6$$

II.2.2.2.3. Orthophosphates et composés azotés

Les mesures des teneurs de l'eau en Orthophosphates et en différentes formes d'azote (NH_4^+ , NO_2^- et NO_3^-) se sont faites par spectrophotométrie, au spectrophotomètre HACH DR 2800. La concentration en azote ammoniacal (exprimée en mg/L de NH_4^+) a été mesurée par la méthode de Nessler sur 25 mL d'échantillon d'eau brute et la lecture s'est faite à la longueur d'onde $\lambda = 425$ nm. Quant aux teneurs en nitrites (NO_2^-), en nitrates (NO_3^-) et en Orthophosphates (PO_4^{3-}), elles ont été mesurées sur 10 mL d'échantillon avec comme réactifs le Nitrivier III, le Nitriver V et le Phosver III respectivement. Les lectures se sont faites aux longueurs d'onde $\lambda = 500$ nm, $\lambda = 507$ nm et $\lambda = 530$ nm respectivement et les résultats ont été exprimés en mg/L de NO_2^- , de NO_3^- et de PO_4^{3-} respectivement.

II.2.2.2.4. Alcalinité, dureté calcique et dureté magnésienne

L'alcalinité a été déterminée par volumétrie en titrant 50 mL d'échantillon d'eau avec de l'acide sulfurique N/50, en présence du rouge vert de méthyl bromocrésol comme indicateur coloré. Les résultats exprimés en mg/L de HCO_3^- sont obtenus par la formule ci-après :

$$\text{Alcalinité (mg/L de HCO}_3^-) = (\text{descente de burette de l'échantillon}) \times 20$$

Les duretés calcique et magnésienne ont été mesurées par volumétrie. En ce qui concerne la dureté calcique; dans 50 mL d'eau de l'échantillon contenu dans un bécher, 1 mL de KCN 1 %, 2 mL de NaOH 2N et une pincée de l'indicateur coloré H-H-S-N-N [acide 2-hydroxy-1-(2-hydroxy-4-sulfo-1-naphtyl-azo)-3-naphtéique] ont respectivement été ajoutés. Le mélange de coloration rose a été titré à l'Idranal III jusqu'à l'apparition de la coloration bleu franc. Les résultats (mg/L de CaCO_3) ont été calculés par la formule :

$$\text{Dureté calcique (mg/L de CaCO}_3) = \text{descente de burette} \times 20$$

La mesure de la teneur en dureté magnésienne a nécessité au préalable le dosage de la dureté totale de l'eau. Pour cela, l'on a introduit successivement dans un bécher, 50 mL d'eau de l'échantillon, 2 mL de KCN 1 %, ainsi que 10 mL tampon ammoniacal et une pincée de noir Eréochrome T comme indicateur coloré. Le mélange de couleur rouge-violet sombre sera ensuite titré à l'Idranal III jusqu'à apparition de la coloration bleu. La dureté totale est obtenue par la formule :

$$\text{Dureté totale (mg/L)} = \text{descente de burette} \times 12 \quad \text{et}$$

$$\text{Dureté magnésienne (mg/L de mg}^{2+}) = (\text{Dureté totale} - 2,497 \times \text{Dureté calcique})/4,118$$

II.2.2.2.5. Oxydabilité

L'oxydabilité a été mesurée par volumétrie. Ainsi, dans un erlenmeyer de 500 mL, 200 mL d'échantillon d'eau brute ont été introduits, puis 2 mL de carbonate monosodique et l'ensemble porté à ébullition sur une plaque chauffante. Dès le début de l'ébullition, 20 mL de KMnO_4 N/80 ont été ajoutés. Dix (10) minutes après le début de l'ébullition, l'erlenmeyer a été refroidi à l'eau courante, puis 5 mL de H_2SO_4 25% et 20 mL de sel de Mohr y ont été ajoutés successivement. L'échantillon décoloré a ensuite été titré au KMnO_4 N/80 jusqu'à obtention d'une couleur rose persistante. L'échantillon témoin est préparé dans les mêmes conditions, mais avec de l'eau distillée. L'oxydabilité exprimée en mg/L de O_2 s'obtient par la formule ci-dessous :

$$\text{Oxydabilité (mg/L de O}_2) = \frac{(q - q_0)}{2} \times 3,95$$

Avec q = descente de burette de l'échantillon ; q_0 = descente de burette du témoin.

II.2.2.2.6. Demande Biochimique en Oxygène (DBO₅)

La détermination de la demande biochimique en oxygène pendant 5 jours s'est faite par la méthode dite « manométrique » à l'aide d'un incubateur à DBO_5 de marque WTW. Des bouteilles à DBO_5 , contenant des volumes de 250 mL de l'échantillon ont été utilisées à cet effet. Dans chacune des bouteilles, un tampon nutritif pour DBO_5 est ajouté, elles sont ensuite incubées pendant 5 jours consécutifs à la température de 20°C. Pendant cette période, les bactéries utilisent l'oxygène présent dans la partie supérieure de la bouteille pour oxyder la matière organique présente dans la solution et rejettent le CO_2 . Ce CO_2 est fixé par les cristaux d'hydroxyde de potassium (présents dans la cupule placée à la tête de chaque bouteille appelée Oxitop). La valeur de la DBO_5 est lue directement sur l'Oxitop et les valeurs sont exprimées en mg/L d' O_2 .

II.2.2.2.7. Demande Chimique en Oxygène (DCO)

La mesure de la Demande Chimique en Oxygène (DCO) s'est faite par la méthode dite de « digestimétrie ». Après homogénéisation des échantillons, 2 mL d'échantillon sont prélevés et introduits dans des tubes à DCO, puis incubés en présence d'un témoin à 150 °C pendant 2 heures dans un réacteur (appareil de chauffage multitubes) de DCO de marque HACH. La valeur de la DCO (exprimée en mg/L) de chaque bassin est lue, après refroidissement des tubes au spectrophotomètre de marque HACH DR/2800.

II.2.2.2.8. Eléments traces métalliques (ETM)

Les ETM (Cu, Pb, Ni, Fe, Zn, Cd, Cr, As, Mn, Sn, Po, Co, Ba, B, Si, Sb) ont été mesurés dans l'eau et les sédiments. Les échantillons d'eau ont été prélevés à l'aide des flacons en

polyéthylène à double bouchage de 500 mL. Ces flacons ont été préalablement nettoyés avec de l'acide nitrique 10%, puis rincés trois fois avec de l'eau distillée et séchés à l'étuve. Les sédiments ont quant à eux été prélevés à l'aide de la microbenne d'Ekman et conservés dans les sachets stériles de 0,5kg. Les Eléments Traces (exprimés en mg/L et mg/kg) ont été dosés au Laboratoire Codimlab à Yaoundé. La méthode utilisée est la spectrométrie d'absorption atomique, à l'aide d'un spectromètre à flamme de type Perkin-Elmer.

II.2.2.2.9. Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)

Les échantillons de sédiments destinés à la mesure des HAP ont été prélevés à l'aide de la microbenne d'Ekman et conservés dans les sachets stériles de 0,5kg. Le dosage s'est fait au Laboratoire Codimlab à Yaoundé en deux phases principales selon la méthode ISO 9377-2 EN par GC/FID : l'extraction et l'analyse [APPEL, 2003]. L'extraction est réalisée par un solvant non polaire (Risulfix 40) sur bande d'absorption des composés aromatiques polycycliques et l'analyse est faite par la chromatographie en phase gazeuse de marque CDS Py modèle 5000S couplée à un détecteur à ionisation de flamme (GC/FID) à 3030 µm. Les résultats sont exprimés en µg/kg sec.

II.2.3. Techniques d'étude de la faune aquatique souterraine

II.2.3.1. Récolte de la stygofaune

Les organismes des puits ont été échantillonnés à l'aide du filet phréatobiologique de Cvetkov (Cvetkov, 1968) modifié de 40 cm de diamètre à l'ouverture, composé d'un cône filtrant avec un vide de maille 150 µm en toile fine monté sur un cercle métallique (Boutin et Boulanouar, 1983). A la base de ce cône est attachée une valve (Aluminium et clapet en caoutchouc) qui permet l'entrée de la faune nageuse lors de la remontée du filet et empêche sa perte pendant la redescente. Le prélèvement a consisté à la descente du filet lesté au fond du puits à l'aide d'une corde. Une fois au fond, on lui fait subir une série de 10 à 15 tractions afin de remuer le substrat pour le mettre en suspension et obtenir un échantillon représentatif et semi-quantitatif du peuplement d'un puits (Idbennacer, 1990). Le filet est ensuite remonté et on obtient ainsi un échantillon de la faune présente dans le puits, sur le substrat, et dans la colonne d'eau. Les échantillons contenant les organismes ont par la suite été fixés à l'alcool à 96° et ramenés au laboratoire.

II.2.3.2. Analyses faunistiques

II.2.3.2.1. Tri et comptage

Les organismes animaux ramenés au laboratoire sont déposés dans des boîtes de Pétri de 8 et 12 cm de diamètre pour les opérations de tri. Le tri et le comptage des organismes ont été effectués de façon minutieuse à l'aide d'une loupe binoculaire de marque WILD M5 (40X) éclairée de façon épiscopique, et parfois diascopique, jusqu'à épuisement des échantillons. Les organismes de même morphologie ont été regroupés dans des salières puis conservés dans des piluliers étiquetés contenant de l'alcool à 96°, pour des dissections ultérieures.

II.2.3.2.2. Identification morphologique

L'identification morphologique des biontes repose sur l'observation à la loupe binoculaire à éclairage épiscopique, des traits de ressemblances/divergences entre les organismes récoltés et ceux représentés dans des ouvrages, des publications et des clés d'identifications (Tachet *et al.*, 2010). Les identifications taxonomiques ont été faites à l'aide des clés d'identifications et des publications de Durand et Levêque (1980), Argano (1994), Coineau *et al.* (1994), de Tachet *et al.* (2010). et Zébazé Togouet *et al.* (2013). Cette observation minutieuse des grands traits morphologiques ne suffit parfois pas pour l'identification.

II.2.3.2.3. Identification des stygobies

Les organismes stygobies récoltés ont été pré-identifiés au Laboratoire d'Hydrobiologie et Environnement, puis conservés dans des tubes Eppendorf contenant de l'alcool à 96°. Les investigations biomoléculaires et morphologiques approfondies sur ces stygobies ont été faites lors d'un stage effectué entre mai et septembre 2021 à l'UMR 6553 ECOBIO de l'Université de Rennes 1 (France).

II.2.3.2.3.1. Dissection et identification morphologique des stygobies

Les spécimens de stygobies mâles et femelles ont été disséqués grâce à un protocole détaillé. En effet, ces organismes ont été trempés dans l'acide lactique pendant 12 heures afin d'assouplir les muscles. Ensuite, ils ont été lavés à l'alcool 96°, puis mis dans le colorant rose (lignine) pendant 12 heures jusqu'à coloration complète. Ces spécimens ont été remis dans l'acide lactique pendant deux (2) heures, étape nécessaire pour éviter la dispersion du colorant après la fixation. Ils ont été lavés à nouveau à l'alcool et disséqués dans la glycérine. Les pièces disséquées ont été montées entre lame et lamelle dans le liquide de Faure (Euparal ou Baume de Canada), puis filmées à l'aide d'un stéréomicroscope surmonté d'une caméra de marque Leica Microsystems Model M205 C. Afin d'obtenir une meilleure qualité des photos, un stacking a été fait grâce au logiciel CombineZ. Les dessins ont été réalisés à l'aide du logiciel

Adobe Illustrator CC 2019 et d'une tablette graphique Wacom Intuos Pro Medium, puis affinés à l'aide du microscope optique. L'identification morphologique de la faune stygobie a été faite en utilisant les publications de Chappuis (1951,1952); Lincoln (1972); Magniez (1979a, 1979b, 1986); et de Zebaze Togouet *et al.* (2013).

II.2.3.2.3.2. Identification biomoléculaire des stygobies

Les analyses biomoléculaires ont consisté à l'extraction de l'ADN, à l'amplification et au séquençage du gène COI.

II.2.3.2.3.2.1. Extraction

L'extraction de l'ADN d'une patte d'un animal a été faite en utilisant les kits d'extraction d'ADN NucleoSpin Tissue (Machery-Nagel™) suivant les instructions du fabricant (Düren, Allemagne).

II.2.3.2.3.2.2. PCR

Le gène COI mitochondrial a été amplifié à l'aide des amorces LCO1490/HCO2198 (Folmer *et al.*, 1994) et UCOIR/UCOIF (Costa *et al.*, 2009). Les réactions en chaîne par polymérase Touch-Down (TD PCR) (Korbie et Mattick, 2008) ont été effectuées dans un volume final de 27 µL contenant 12 µL d'eau PCR, 10,5 µL de l'enzyme (Taq polymérase), 1,8 µL de chaque amorce (5 µM) et 2 µL de l'extrait d'ADN. Une étape de dénaturation à 95°C pendant 5 minutes a été suivie de 35 cycles (30 secondes à 95°C, 90 secondes à chaque température et 30 secondes à 72°C) avec une étape d'extension finale pendant 30 minutes à 70°C. La TD-PCR est caractérisée par une température de recuit initiale (55°C dans notre étude) supérieure à la température de fusion projetée (T_m) des amorces utilisées, puis passe progressivement à une température de recuit plus basse et plus permissive au cours des cycles successifs (-0,5°C par cycle pendant les 8 premiers cycles). Les 27 cycles suivants ont été réalisés à 51°C.

II.2.3.2.3.2.3. Séquençage

Les résultats de la PCR ont été vérifiés par électrophorèse sur gel d'agarose 1.5%, puis les produits de la PCR ont été purifiés sur colonne G50 et séquencés dans les deux sens par la plateforme de séquençage de l'ADN de l'Institut de Génétique et de Développement de

l'Université de Rennes (<https://igdr.univrennes1.fr/en>) à l'aide d'un séquenceur Applied Biosystem 3130 XL.

Toutes les séquences COI obtenues dans quatre puits sont déposées sur Genbank (numéros d'accès OL514108 ; OL514109 ; OL514110 ; OL51411 et OL51412) et sur le système de données Barcode of Life (BOLD) (BOLD process id : METAF001-21, METAF002-21, METAF003-21, METAF004-21 et METAF005-21).

Les nouvelles séquences COI ont été complétées par des séquences COI téléchargées à partir de Genbank : deux séquences d'espèces *Metastenasellus* du Bénin (numéros d'accès KY623773.1 et KY623774.1); quatre de *M. camerounensis* du Cameroun (numéros d'accès KY623769.1 ; KY623770.1 ; KY623771.1 ; KY623772.1), et deux d'une espèce *Metastenasellus* inconnue du Cameroun (numéros d'accès KY623775.1 ; KY623776.1). Toutes les séquences ont été alignées avec l'algorithme MUSCLE (Edgar, 2004) implémenté dans SEAVIEW ver. 5 (Gouy *et al.*, 2021) pour explorer la diversité des espèces de *Metastenasellus* en utilisant différentes méthodes de délimitation des espèces mises en œuvre dans iTAXOTOOLS 0.1 (Vences *et al.*, 2021). Premièrement, selon les méthodologies basées sur la distance : l'Assemble Species by Automatic Partitioning (ASAP) (Puillandre *et al.*, 2021) et l'Automatic Barcode Gap Discovery (ABGD) (Puillandre *et al.*, 2012). Ensuite, les résultats de la délimitation des espèces basée sur la distance génétique ont fait l'objet d'une validation croisée avec les méthodes de délimitation basées sur les arbres phylogénétiques, à savoir : Generalized Mixed Yule Coalescent (GMYC) (Pons *et al.*, 2006) et les processus d'arbres de Poisson à taux multiples (mPTP) (Kapli *et al.*, 2017). Pour les méthodes de délimitation des espèces basées sur les arbres, nous avons construit un arbre phylogénétique dans un cadre de maximum de vraisemblance (ML) en utilisant l'algorithme PhyML v3.1 (Guindon *et al.*, 2010) implémenté dans SEAVIEW ver. 5 (Gouy *et al.*, 2021). Pour l'arbre, nous avons utilisé le modèle HKY85+I, sélectionné comme le modèle d'évolution le mieux ajusté avec jModelTest 2 (Darriba *et al.*, 2012).

Pour la visualisation finale avec les espèces de *Metastenasellus* déjà séquencées, l'arbre de voisinage de toutes les séquences COI a été établi en utilisant l'algorithme BIONJ avec le modèle d'évolution à deux paramètres de Kimura (K2P) (Kimura, 1980) et un bootstrap avec 1000 répliques. Les arbres ont été construits dans SEAVIEW ver. 5 (Gouy *et al.*, 2021).

II.2.4. Traitement des données abiotiques et biotiques

Les logiciels et tableurs EXCEL, XL-STAT 2010, RStudio, STATISTICA SPSS 20.0 et MATLAB 6.1 ont été utilisés au cours de cette étude. Ils ont permis de mettre en place des

tableaux, schémas, courbes, graphiques et diagrammes nécessaires aux interprétations des résultats.

II.2.4.1. Richesse taxonomique et abondance

La richesse taxonomique (S) indique le nombre de taxons recensés dans un milieu et à un moment donné. Elle renseigne sur la variabilité des niches écologiques d'une station ou d'un site (Alliaume *et al.*, 1990).

L'abondance pour sa part, désigne le nombre d'individus (N) d'une espèce ou d'un groupe taxonomique dans un prélèvement donné.

II.2.4.2. Fréquence d'occurrence des taxa

La fréquence d'occurrence (F) exprimée en pourcentage, renseigne sur la constance d'une espèce ou d'un taxon dans un habitat donné sans aucune indication sur son importance quantitative (Dajoz, 2000). On distingue :

- les espèces omniprésentes qui apparaissent dans tous les relevés (100 %) ;
- les espèces régulières, présentes dans 75 à < 100 % des relevés ;
- les espèces constantes, présentes dans 50 à < 75 % des relevés ;
- les espèces accessoires présentes dans 25 à < 50 % des relevés ;
- et les espèces rares présentes dans moins de 25 % des relevés (Dufrêne et Legendre, 1997).

Cet indice est basé sur la matrice de présence/absence et se calcule à partir de la relation ci-dessous :

$$F = \frac{P_i \times 100}{P_t} ; \text{ où } P_t \text{ est le nombre total de prélèvement et } p_i \text{ le nombre de prélèvement où l'espèce } i \text{ est présente.}$$

II.2.4.3. Indice de diversité (H') de Shannon et Weaver (1948)

L'indice de diversité H' est le plus couramment utilisé dans la littérature (Grall et Hily, 2003). Cet indice a permis d'estimer la diversité taxonomique des organismes qui composent les peuplements des puits étudiés. Il permet d'avoir rapidement, en un seul chiffre, une évaluation de la biodiversité d'un peuplement. Il tient compte de la taille de l'échantillon et des abondances relatives des taxa considérés. Il a été calculé par la formule suivante :

$$H' = - \sum_{i=1}^S \left(\frac{n_i}{N} \log_2 \frac{n_i}{N} \right)$$

Où :

n_i est l'effectif du taxon i dans un échantillon, i allant de 1 à S (nombre total d'espèces) ;

N est le nombre total d'individus de l'échantillon ;

H' varie de 0 à $\log_2 S$. La diversité est grande lorsque H' tend vers $\log_2 S$ (Lévêque & Balian, 2005)

L'indice de diversité (H') de Shannon et Weaver renseigne également sur l'état écologique d'un milieu (**Tableau X**).

Tableau X : Echelle de valeur de l'indice de Shannon et Weaver et sa signification écologique (Simboura et Zenetos, 2002).

Valeur de H'	Etat	Signification environnementale
$0 < H' < 1,5$	Mauvais	Milieu très pollué
$1,5 < H' < 3$	Pauvre	Milieu pollué
$3 < H' < 4$	Médiocre	Milieu modérément pollué
$4 < H' < 5$	Bon	Milieu en transition
$H' > 5$	Haut	Site de référence

II.2.4.4. Equitabilité (J) de Piélou (1966)

L'indice J de Piélou (1966) a été calculé dans chaque site pour déterminer le degré de dominance d'un taxon par rapport aux autres. L'indice de Piélou varie de 0 à 1 et s'exprime par la formule qui suit :

$$J = \frac{H'}{\log_2 S} ; \text{Où } H' = \text{Indice de Shannon et Weaver et } S = \text{Richesse spécifique totale}$$

J varie de 0 lorsque le milieu est dominé par une espèce à 1 lorsqu'il y'a équirépartition des individus dans le peuplement.

II.2.4.5. Analyses univariées et multivariées

II.2.4.5.1. Analyses univariées

Le coefficient de corrélation des rangs de Spearman a été calculé pour mesurer les degrés de liaison entre les variables abiotiques d'une part, et entre les variables abiotiques et biologiques d'autre part. Ce coefficient se calcule selon la formule ci-dessous :

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n}$$

Avec n = nombre total d'observations ; d_i = différence entre les rangs des deux séries de mesures considérées.

Le test non paramétrique de Kruskal-Wallis (test H) a été utilisé pour vérifier sur le plan spatial et saisonnier, la signification des différences (ou similarités) de variances des paramètres abiotiques.

Chaque fois que le test de Kruskal-Wallis a montré une différence significative entre les variances des échantillons comparés, le test de comparaison multiple de rangs ou le test U de Mann-Whitney a été utilisé pour une comparaison deux à deux, afin d'isoler les échantillons qui diffèrent significativement.

II.2.4.5.2. Analyses multivariées

II.2.4.5.2.1. Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) a été utilisée pour établir la typologie abiotique et biotique des échantillons sur la base de l'ensemble des paramètres environnementaux mesurés et des abondances des taxons souterrains identifiés à chaque site d'échantillonnage tout au long de l'étude. Cette méthode de statistique factorielle descriptive a pour objectif de présenter sous forme graphique, le maximum d'informations contenues dans un tableau de données de taille importante (Philippeau, 1992). La matrice de données est composée des échantillons « n » en ligne sur lesquels sont mesurés des variables quantitatives « p » disposées en colonnes. Ces analyses ont été réalisées à l'aide de logiciel RStudio.

II.2.4.5.2.2. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

La CAH a été utilisée pour regrouper les échantillons par campagne en fonction d'une part, de leurs similarités abiotiques, et d'autre part, de la similarité de peuplements aquatiques souterrains sur la base des abondances moyennes des taxons en utilisant le logiciel RStudio. La similarité a été employée dans cette analyse de classification ascendante (Williams *et al.*, 1971). Le principe de cette analyse est de regrouper des individus selon leurs ressemblances et les représenter sous la forme d'un arbre de classification. Le nombre de groupes n'est pas connu a priori. L'élaboration de cet arbre est ascendante, par regroupement successif des individus. L'arbre de classification relie un individu à un autre ou à un sous-groupe d'individus issus eux-mêmes de regroupements antérieurs. Lorsque l'on coupe l'arbre au niveau du dernier regroupement, on obtient deux groupes d'individus. Si la division est effectuée au niveau de l'avant-dernier regroupement, on obtient trois groupes (McCune et Grace, 2002). L'application de la CAH est également possible à une classification numérique pour regrouper des variables plutôt que des individus. On obtient ainsi des groupes de variables dont les valeurs se ressemblent. Plus le nombre de groupes est faible, plus la quantité d'information retenue sera

moindre. En général, le nombre de groupes à retenir est choisi de sorte qu'au moins 50 % des informations du tableau de départ soient prises en compte (Glèlè *et al.*, 2016).

II.2.4.5.2.3. Réseau de Neurones Artificiels : cartes auto-organisatrices

L'extension Self-Organizing Maps (SOM) ou Cartes Auto-Organisatrices du modèle de Réseau de Neurones Artificiels (RNA) développé par Kohonen (2001) a été utilisée pour établir la biotypologie des stations sur la base de la matrice d'abondance des taxa. Cette analyse a permis d'effectuer une classification non linéaire montrant des patrons simplifiés et d'identifier des groupes semblables à partir des bases de données biotiques enregistrées. La SOM a été réalisée à l'aide du logiciel MATLAB 6.1.

II.2.4.5.2.4. Analyse en Coordonnées Principales (PCoA-Principal Coordinates Analysis)

La PCoA (Principal Coordinates Analysis) a été utilisée pour évaluer la structuration de la faune récoltée dans les différents sites. Les données biotiques enregistrées, toutes préalablement $\log(x+1)$ transformées et normalisées, sont entrées dans le logiciel XLSTAT en fonction des sites d'étude. Ce logiciel génère graphiquement une matrice de ressemblance entre les différents sites et les valeurs propres sont interprétées en termes de pourcentage de variabilité représenté.

II.2.4.5.2.5. Analyse permutacionnelle multivariée de la variance (PERMANOVA)

La PERMANOVA a été effectuée pour montrer d'une part la variation au niveau des sites étudiés et des saisons et d'autre part les interactions entre les sites et les saisons. Les données abiotiques et biotiques ont été traitées par le logiciel Primer e. La PERMANOVA donne la valeur P de permutation (P (perm)) et permet de vérifier sur la base des données biotiques ou abiotiques si un site diffère significativement de l'autre en indiquant en fonction de ce seuil de significativité les principaux facteurs de variabilité.

II.2.4.5.2.6. Distance based linear models (DistLm) et Distance based redundancy analysis (dbRDA)

La régression linéaire multiple multivariée (DistLM- Distance based linear models) est une méthode d'ordination similaire à l'analyse de redondance, mais elle permet des indices de dissemblance non euclidiens (Legendre et Anderson, 1999). Elle a été effectuée sur les données biotiques et abiotiques enregistrées toutes préalablement $\log(x+1)$ transformées et normalisées, afin d'identifier et modéliser les facteurs abiotiques influençant la distribution de la faune.

Ensuite, une analyse de redondance basée sur la distance (dbRDA - Distance based redundancy analysis) a permis de visualiser les résultats de la DistLM. Ces analyses ont été réalisées avec le logiciel Primer.

CHAPITRE III:

RESULTATS ET DISCUSSION

III.1. Résultats

III.1.1. Physicochimie des eaux souterraines de Douala

III.1.1.1. Caractérisation physicochimique de l'eau des stations d'échantillonnage

Les variations intrasites des paramètres abiotiques mesurés sont présentées ci-dessous dans les cinq (05) sites étudiés.

III.1.1.1.1. Physicochimie des eaux souterraines et hydromorphométrie des stations de PK 21

Dans le site périurbain de PK 21, les variables abiotiques ont variés d'un puits à l'autre. Les paramètres tels que l'altitude (de 48m, PKP10 à 63m, PKP3 ; $p = 0,000115$), la profondeur des puits (de 6m, PKP9 et PKP10 à 9m, PKP1 ; $p = 0,000115$), le pH (de 3,4 UC, PKP3 à 5,06 UC, PKP9 ; $p = 0,027$), la Conductivité électrique (de 154,6 $\mu\text{S}/\text{Cm}$, PKP9 à 947 $\mu\text{S}/\text{Cm}$, PKP6 ; $p = 0,0003$), les TDS (de 110 mg/L, PKP9 à 670 mg/L, PKP6, $p = 0,0002$), la salinité (de 77,5 ppm, PKP9 à 445 ppm, PKP6 ; $p = 0,0002$), l'Oxygène dissous (de 51%, PKP9 à 88%, PKP1, $p = 0,0067$) ont varié significativement d'un puits à l'autre (**Tableau XI**). D'autres paramètres par contre n'ont pas varié significativement d'un puits à l'autre. Il s'agit de la température ($26,16 \pm 2,02$ °C), du CO₂ dissous ($15,18 \pm 8,3$ mg/L), de l'alcalinité ($14,55 \pm 25,25$ mg/L), de l'oxydabilité ($1,99 \pm 2,09$ mg/L), de la Couleur ($46,35 \pm 56,61$ UPt-Co), des MES ($8,4 \pm 8,44$ mg/L), de la turbidité ($7,08 \pm 8,45$ FTU), des nitrites ($0,0065 \pm 0,020$ mg/L), des nitrates ($1,185 \pm 1,16$ mg/L), des orthophosphates ($0,904 \pm 1,15$ mg/L), de l'Azote ammoniacal ($0,068 \pm 0,07$ mg/L), de la DCO ($217,9 \pm 259,33$ mg/L), de la DBO₅ ($7,1 \pm 8,24$ mg/L), des duretés calcique ($0,55 \pm 1,2$ mg/L) et magnésienne ($27 \pm 67,19$ mg/L) et de l'épaisseur de la couche d'eau ($145,25 \pm 85,08$ cm) (**Tableau XI**).

III.1.1.1.2. Physicochimie des eaux souterraines et hydromorphométrie des stations de Ndogbong et Cité SIC

Les paramètres abiotiques mesurés durant cette étude ont également varié d'un puits à l'autre dans les sites de Ndogbong et de Cité SIC.

Dans le site urbain de Ndogbong, seulement la profondeur des puits (de 1,8 m, NDOGP2 à 2,4 m, NDOGP1, $p = 0,004$) et l'altitude (de 19 m, NDOGP3 à 31 m, NDOGP1, $p = 0,004$) ont varié significativement d'un puits à l'autre (**Tableau XII**). Par contre, la température ($25,67 \pm 2,78$ °C), le pH ($5,47 \pm 0,24$ UC), la conductivité électrique ($843,17 \pm 88,11$ $\mu\text{S}/\text{Cm}$), les TDS ($601,42 \pm 59,6$ mg/L), la salinité ($400,5 \pm 46,27$ ppm), l'Oxygène dissous ($50,16 \pm 8,14$ %), le CO₂ dissous ($22 \pm 10,67$ mg/L), l'alcalinité ($6,17 \pm 3,35$ mg/L), l'oxydabilité ($1,40 \pm 1,74$

mg/L), la couleur ($23,5 \pm 26,25$ UPt-Co), les MES ($11,83 \pm 10,31$ mg/L), la turbidité ($6,67 \pm 8,39$ FTU), les nitrites ($0,0242 \pm 0,029$ mg/L), les nitrates ($1,383 \pm 1,38$ mg/L), les orthophosphates ($0,198 \pm 0,29$ mg/L), l'Azote ammoniacal ($0,063 \pm 0,056$ mg/L), la DCO ($252 \pm 183,87$ mg/L), la DBO₅ ($7,33 \pm 11,22$ mg/L), les duretés calcique ($1,265 \pm 2,33$ mg/L) et magnésienne ($7,4 \pm 19,76$ mg/L) et l'épaisseur de la couche d'eau ($135 \pm 56,65$ cm) n'ont pas varié significativement d'un puits à l'autre durant cette étude (**Tableau XII**).

Dans le site urbain de Cité SIC, l'altitude (de 7 m, SICP2 à 14m, SICP1 ; $p = 0,011$), la profondeur des puits (de 0,5 m, SICP2 à 1,8 m, SICP3 ; $p = 0,011$), l'épaisseur de la couche d'eau (de 20 cm, SICP2 à 180 cm, SICP1 ; $p = 0,022$), la conductivité électrique (de 568 μ S/Cm, SICP2 à 1619 μ S/Cm, SICP1 ; $p = 0,019$), les TDS (de 402 mg/L, SICP2 à 1015 mg/L, SICP1 ; $p = 0,019$), la salinité (de 264 ppm, SICP2 à 785 ppm, SICP1 ; $p = 0,019$) et la DCO (de 22 mg/L, SICP2 à 1164 mg/L, SICP1, $p = 0,034$) ont varié significativement d'un puits à l'autre (**Tableau XII**). Par contre, la température ($25,85 \pm 3,15$ °C), le pH ($5,35 \pm 0,59$ UC), l'Oxygène dissous ($47,01 \pm 13,83$ %), le CO₂ dissous ($30,23 \pm 20,52$ mg/L), l'alcalinité ($10,9 \pm 11,4$ mg/L), l'oxydabilité ($1,38 \pm 1,3$ mg/L), la couleur ($11,3 \pm 18,03$ UPt-Co), les MES ($9,9 \pm 8,81$ mg/L), la turbidité ($7,3 \pm 7,99$ FTU), les nitrites ($0,1143 \pm 0,21$ mg/L), les nitrates ($1,64 \pm 2,45$ mg/L), les orthophosphates ($0,42 \pm 0,51$ mg/L), l'Azote ammoniacal ($0,064 \pm 0,04$ mg/L), la DBO₅ ($2,57 \pm 2,15$ mg/L), les duretés calcique ($0,84 \pm 0,91$ mg/L) et magnésienne ($7,13 \pm 18,03$ mg/L) n'ont pas varié significativement d'un puits à l'autre durant cette étude (**Tableau XII**).

Tableau XI : Valeurs minimales, maximales, moyennes et écart-types des paramètres physicochimiques des eaux souterraines et hydromorphométrique des stations de PK 21

Stations Paramètres	PKP1		PKP2		PKP3		PKP4		PKP5		PKP6		PKP7		PKP8		PKP9		PKP10	
	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ
Couche d'eau (cm)	30 195	121,25 ± 79,41	50 230	151,25 ± 88,16	200 310	267,5 ± 53,15	100 280	208,75 ± 78,78	30 245	146,25 ± 99,11	30 220	142,5 ± 86,55	50 200	146,25 ± 67,5	40 85	60 ± 19,58	50 90	71,25 ± 19,31	50 210	137,5 ± 71,82
Température (°C)	23 27,9	25,88 ± 2,22	23,2 27,5	25,75 ± 2,04	24,2 29,5	26,78 ± 2,53	24,3 28	26,2 ± 1,87	23,4 28,7	26,15 ± 2,43	23,7 28,3	26,33 ± 2,17	23,2 27,4	26,08 ± 1,99	22,7 27,6	26,03 ± 2,28	22,6 27,9	26,4 ± 2,55	22,4 28	26,05 ± 2,57
pH (UC)	4,18 4,35	4,25 ± 0,09	4,01 4,78	4,33 ± 0,34	3,4 4,55	3,97 ± 0,47	3,71 4,25	3,90 ± 0,24	3,92 4,92	4,38 ± 0,52	4 4,38	4,13 ± 0,18	3,61 4,44	3,94 ± 0,36	4,01 4,44	4,19 ± 0,18	4,6 5,06	4,83 ± 0,19	4,22 4,64	4,50 ± 0,20
Conductivité Electrique (µS/Cm)	527 609	567,5 ± 33,73	519 575	555,5 ± 25,72	565 619	608 ± 31,94	704 822	762,75 ± 49,42	645 781	696 ± 58,98	658 947	775,75 ± 123,4	540 611	580,75 ± 31,74	191,8 581	467,45 ± 184,4	154,6 554	447,15 ± 195,14	562 613	588 ± 22,23
TDS (ppm)	373 433	402,5 ± 24,72	369 409	394,5 ± 18,19	401 455	431,75 ± 22,77	500 583	541,5 ± 34,95	458 556	494,75 ± 42,45	470 670	550,5 ± 85,70	388 433	412 ± 22,18	136 411	269 ± 150,99	110 394	256,25 ± 153,20	399 435	417,5 ± 15,78
Salinité (ppm)	256 283	266,25 ± 11,76	253 267	261,25 ± 6,55	276 298	286,5 ± 9,33	346 385	361,5 ± 17,41	301 367	330,25 ± 28,16	305 445	367 ± 60,16	252 293	274 ± 18,20	90,4 283	180,45 ± 102,37	77,5 259	169,85 ± 98,55	269 285	276,75 ± 6,85
O2 dissous (% saturation)	66 88	72,3 ± 10,57	62 84	73,95 ± 9,07	72,9 77,8	75,3 ± 2,09	62,8 80	71,05 ± 7,30	68 83,6	74,18 ± 6,93	63 78,3	68,9 ± 6,63	52 67,6	61,07 ± 6,97	53,6 64,2	58,48 ± 5,47	51 68,2	58,93 ± 9,06	52 63,7	276,75 ± 6,85
CO2 dissous (mg/L)	7,04 22,88	14,07 ± 7,48	1,76 24,64	12,32 ± 9,64	8,8 24,64	18,04 ± 7,92	3,52 24,64	14,08 ± 9,64	1,76 15,84	6,6 ± 6,33	5,28 24,64	11,88 ± 9,13	17,6 29,92	23,32 ± 5,26	7,04 17,6	11,44 ± 5,28	14,08 35,2	22,44 ± 9,02	14,08 21,12	17,6 ± 2,87
Alcalinité (mg/L)	2 104	31 ± 49,11	2,0 56	21 ± 25,53	4 118	40,5 ± 53,82	4,0 32	12,5 ± 13,10	2,0 16	6,5 ± 6,40	2,0 14	6,5 ± 6,40	2,0 14	7 ± 5,29	2,0 30	12,5 ± 13,40	2,0 6	4,5 ± 1,91	2,0 4	3,5 ± 1,00
Oxydabilité (mg/L)	0,40 6,91	2,57 ± 3,00	0,20 2,77	1,58 ± 1,06	0,99 2,17	1,43 ± 0,57	0,40 6,12	3,31 ± 2,67	0,20 3,16	1,33 ± 1,27	0,40 3,95	2,17 ± 1,59	0,20 2,37	1,58 ± 0,95	0,40 1,98	0,84 ± 0,76	0,20 10,07	2,81 ± 4,84	0,40 4,54	2,27 ± 1,80
Couleur (UPt-Co)	0 148	54,25 ± 64,58	0 111	63,00 ± 46,44	0 148	41,25 ± 71,62	0 57	19 ± 26,65	2 121	35,5 ± 57,15	0 113	32 ± 54,46	0 208	64,75 ± 98,48	5 153	57 ± 67,75	0 109	51,5 ± 45,97	0 139	45,25 ± 65,56
MES (mg/L)	3,0 21	9 ± 8,16	0 19	9,75 ± 7,80	2,0 12	6,5 ± 4,20	0 11	4,5 ± 5,07	1,0 21	6,75 ± 9,54	0 14	7,5 ± 5,97	0 27	8,75 ± 12,74	2,0 36	13 ± 15,71	0 22	9,75 ± 9,18	0 20	8,5 ± 8,5
Turbidité (FTU)	0 26	10,75 ± 10,94	0 17	9,5 ± 7,59	0 15	6,75 ± 7,89	0 7	3,25 ± 3,30	0 23	7,75 ± 10,37	0 12	3,00 ± 6,00	0 21	5,25 ± 10,50	0 20	8,00 ± 8,52	0 29	12,00 ± 13,64	0 15	4,5 ± 7,05
Nitrites (mg/L NO₂⁻)	0 0,018	0,006 ± 0,008	0 0,009	0,004 ± 0,004	0 0,010	0,003 ± 0,005	0,001 0,010	0,004 ± 0,004	0 0,010	0,003 ± 0,003	0 0,006	0,002 ± 0,003	0 0,126	5,25 ± 10,50	0 20	8,00 ± 8,52	0 29	12,00 ± 13,64	0 15	4,5 ± 7,05
Nitrates (mg/L NO₃⁻)	0 3,3	1,3 ± 1,44	0,2 2,7	1,28 ± 1,15	0 2,7	0,9 ± 1,22	1,5 2,5	1,78 ± 0,49	0,4 2,9	1,25 ± 1,16	0 3,1	1,08 ± 1,38	0 3,3	1,1 ± 1,49	0 2	0,65 ± 0,94	0 3,5	1,15 ± 1,65	0,3 3,4	1,38 ± 1,44
Orthophosphates (mg/L PO₄³⁻)	0 2,36	0,59 ± 1,18	0,07 3,10	1,27 ± 1,30	0,01 2,45	0,78 ± 1,15	0,01 2,92	1,57 ± 1,46	0 2,76	0,71 ± 1,37	0 2,89	0,72 ± 1,44	0 2,34	1,00 ± 1,15	0 2,62	0,94 ± 1,18	0 1,79	0,47 ± 0,88	0,09 3,06	0,99 ± 1,40
Azote ammoniacal (mg/L NH₄⁺)	0 0,19	0,07 ± 0,09	0,02 0,10	0,06 ± 0,03	0,03 0,21	0,09 ± 0,08	0,01 0,09	0,04 ± 0,04	0,01 0,22	0,07 ± 0,10	0 0,14	0,04 ± 0,07	0 0,18	0,06 ± 0,08	0,02 0,14	0,07 ± 0,05	0,02 0,19	0,10 ± 0,07	0,01 0,24	0,08 ± 0,11
DCO (mg/L)	32 54	43 ± 15,56	159 165	162 ± 4,24	104 239	171,5 ± 95,46	233- 687	460 ± 321,03	14 657	335,5 ± 454,67	33 904	468,5 ± 615,9	17 222	119,5 ± 144,96	14 461	237,5 ± 316,08	19 92	55,5 ± 51,62	17 235	126 ± 154,15
DBO₅ (mg/L)	1,0 9,0	4,33 ± 4,16	1,0 17	8,67 ± 8,02	1,0 27	10,33 ± 14,47	1,0 22	8,00 ± 12,12	1,0 3,0	1,67 ± 1,15	1,0 4,0	2,67 ± 1,53	2,0 16	7,00 ± 7,81	1,0 27	10,67 ± 14,22	1,0 12	8,33 ± 6,35	2,0 21	9,33 ± 10,21
Dureté Calcique (mg/L)	0 3,8	1,03 ± 1,85	0,08 0,40	0,24 ± 0,15	0 2,38	0,78 ± 1,1	0 5,8	1,78 ± 2,75	0 3	0,77 ± 1,49	0 0,40	0,10 ± 0,20	0 0,44	0,12 ± 0,21	0 0,21	0,09 ± 0,10	0 1,29	0,33 ± 0,64	0 1	0,3 ± 0,48
Dureté Magnésienne (mg/L)	0 1,32	0,33 ± 0,66	0 13,20	4,22 ± 6,23	0,18 114	28,97 ± 56,69	0 2,06	0,76 ± 0,98	0 317,6	79,67 ± 158,62	0 58,8	14,84 ± 29,31	0 61,6	15,49 ± 30,96	0,99 205,6	52,58 ± 102,02	0,5 140,4	35,96 ± 69,63	0 148	37,16 ± 73,9

Tableau XII : Valeurs minimales, maximales, moyennes et écart-types des paramètres physicochimiques des eaux souterraines et hydromorphométrique des stations de Ndogbong et Cité SIC

Sites Stations Paramètres	NDOGBONG						CITE SIC					
	NDOGP1		NDOGP2		NDOGP3		SICP1		SICP2		SICP3	
	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ
Couche d'eau (cm)	100	162,5	10	90	100	152,5	110	152,5	20	35	100	105
	220	± 50,580	130	± 54,772	200	± 45,735	180	± 30,96	45	± 10,80	110	± 7,07
Température (°C)	22,9	25,35	22,2	24,95	22,2	26,7	23,4	26,08	24,1	27,2	22,5	22,7
	27,9	± 2,66	27,8	± 3,07	29,2	± 3,09	28,8	± 2,87	30,3	± 3,52	22,9	± 0,28
pH (UC)	5,09	5,25	5,26	5,6	5,3	5,55	4,84	5,31	4,71	4,92	5,71	5,79
	5,35	± 0,12	5,83	± 0,24	5,73	± 0,19	6,5	± 0,80	5,15	± 0,24	5,86	± 0,11
Conductivité Electrique (µS/Cm)	724	801	786	801,75	880	926,75	1176	1352	568	590,25	1049	1075,5
	969	± 114,10	822	± 14,97	966	± 35,38	1619	± 188,41	611	± 21,9	1102	± 37,48
TDS (ppm)	523	576	558	570	627	658,25	833	925,5	402	418,25	744	762,5
	689	± 76,22	588	± 12,75	685	± 23,82	1015	± 74,43	432	± 16,58	781	± 26,6
Salinité (ppm)	335	378,25	369	381,25	415	442	585	654,25	264	277,75	521	521,5
	470	± 7,07	392	± 4,95	460	± 16,26	785	± 89,08	298	± 15,97	522	± 0,71
O2 dissous (% saturation)	46	53,88	40,9	48,68	37	47,93	16	40,725	45,6	49,875	42,7	53,85
	62,2	± 7,23	59,9	± 8,17	60,3	± 9,80	60,1	± 18,98	58,3	± 5,99	65	± 15,77
CO2 dissous (mg/L)	1,76	21,56	3,52	22	10,56	22,44	21,12	45,21	8,8	15,84	19,36	29,04
	31,68	± 13,51	29,92	± 12,40	28,16	± 8,05	78,75	± 24,2	21,12	± 6,26	38,72	± 13,69
Alcalinité (mg/L)	2,0	6	4,0	5	4,0	7,5	4,0	10,5	2,0	9,75	2,0	14
	12	± 4,32	6,0	± 1,15	12	± 4,12	22	± 8,06	32	± 9,75	26	± 16,97
Oxydabilité (mg/L)	0,395	0,642	0,198	1,037	0,590	2,518	0,40	1,63	0,20	1,19	0,59	1,28
	0,790	± 0,189	1,778	± 0,691	6,715	± 2,828	4,35	± 1,87	2,37	± 1,06	1,98	± 0,98
Couleur (Upt-Co)	0	15,75	0	27	0	27,75	0	21	0	7,25	0,00	0,00
	42	± 20,11	51	± 20,93	86	± 39,53	59	± 26,01	18	± 8,14	0,00	± 0,00
MES (mg/L)	0	12	4,0	12,75	2,0	10,75	3,0	10,5	0,0	11	0,0	6,5
	34	± 15,58	22	± 7,46	22	± 9,43	13	± 5,00	29	± 13,04	13	± 9,19
Turbidité (FTU)	0	8,5	0	7,5	0	4	0,0	10	0,0	3,5	0,0	9,5
	24	± 11,36	17	± 8,81	13	± 6,06	22	± 9,63	6	± 2,52	19	± 13,44
Nitrites (mg/L NO₂⁻)	0,004	0,0195	0	0,022	0,004	0,0313	0,009	0,243	0,005	0,034	0,005	0,018
	0,06	± 0,027	0,07	± 0,032	0,08	± 0,033	0,660	± 0,308	0,110	± 0,051	0,030	± 0,005
Nitrates (mg/L NO₃⁻)	0	1,625	0	1,125	0,4	1,4	0,4	3,4	0	0,6	0	0,2
	2,7	± 1,15	3,3	± 1,556	4	± 1,744	7,9	± 3,21	1,8	± 0,83	0,4	± 0,28
Orthophosphates (mg/L PO₄³⁻)	0,032	0,204	0,023	0,346	0	0,045	0,000	0,402	0,001	0,278	0,014	0,745
	0,561	± 0,242	0,979	± 0,434	0,138	± 0,065	0,970	± 0,435	0,837	± 0,388	1,476	± 1,034
Azote ammoniacal (mg/L NH₄⁺)	0	0,053	0,01	0,06	0,02	0,078	0,01	0,08	0,00	0,04	0,07	0,08
	0,12	± 0,050	0,17	± 0,074	0,13	± 0,056	0,11	± 0,05	0,08	± 0,04	0,09	± 0,01
DCO (mg/L)	171	289	119	149	87	318	376	770	22	159	199	517,5
	407	± 166,877	179	± 42,426	549	± 326,683	1164	± 557,20	296	± 193,75	836	± 450,43
DBO₅ (mg/L)	2,0	14,0	6,0	10,047	1,0	8,267	1,0	2,67	1,0	2,33	3,0	3,00
	4	± 1,73	36	± 19,079	11	± 5,00	6	± 2,89	5	± 2,31	3	± 0,00
Dureté Calcique (mg/L)	0,06	2,495	0	0,875	0	0,425	0,1	0,95	0	1,10	0	0,10
	8,4	± 3,975	1,72	± 0,817	1,07	± 0,848	2,4	± 1,01	2,4	± 0,99	0,2	± 0,14
Dureté Magnésienne (mg/L)	0	1,788	0,31	18,935	0	1,485	0	1,81	0	15,90	0	0,24
	3,18	± 1,500	70	± 34,069	3,24	± 1,480	4,68	± 2,21	58,2	± 28,25	0,47	± 0,33

III.1.1.1.3. Physicochimie des eaux et hydromorphométrie des stations de ZIBA

Dans le site de la Zone Industrielle de Bassa (ZIBA), les variables abiotiques ont variés d'un puits à l'autre. Ainsi, l'altitude (de 12 m, ZIBAP7 à 28 m, ZIBAP12 ; $p = 1,75 \times 10^{-7}$), la profondeur des puits (de 0,7 m, ZIBAP1 à 4,2 m, ZIBAP12 ; $p = 1,75 \times 10^{-7}$), l'épaisseur de la couche d'eau (de 15 cm, ZIBAP5 et ZIBAP14 à 250 cm, ZIBAP9 ; $p = 0,00025$), le pH (de 4,22 UC, ZIBAP6 à 14 UC, ZIBAP4 et ZIBAP10 ; $p = 0,000038$), la conductivité électrique (de 830 $\mu\text{S}/\text{Cm}$, ZIBAP2 à 9400 $\mu\text{S}/\text{Cm}$, ZIBAP14 ; $p = 3,95 \times 10^{-6}$), les TDS (de 589 mg/L, ZIBAP2 à 6680 mg/L, ZIBAP14, $p = 3,88 \times 10^{-6}$), la salinité (de 390 ppm, ZIBAP2 à 5040 ppm, ZIBAP14 ; $p = 3,05 \times 10^{-6}$), les Nitrites (de 0,002 mg/L, ZIBAP2 à 0,262 mg/L, ZIBAP7 ; $p = 0,0133$), les nitrates (de 0 mg/L, ZIBAP1 à 8,2 mg/L, ZIBAP9 ; $p = 0,000044$) ont varié significativement d'un puits à l'autre (**Tableau XIII**). Par contre, la température ($26,81 \pm 2,4$ °C), l'Oxygène dissous ($56,75 \pm 10,17$ %), le CO_2 dissous ($29,33 \pm 13,97$ mg/L), l'alcalinité ($8,33 \pm 5,79$ mg/L), l'oxydabilité ($2,07 \pm 1,7$ mg/L), la couleur ($58,05 \pm 47,45$ UPt-Co), les MES ($9,9 \pm 9,06$ mg/L), la turbidité ($11,62 \pm 12,23$ FTU), les orthophosphates ($0,94 \pm 1,4$ mg/L), l'Azote ammoniacal ($0,07 \pm 0,07$ mg/L), la DCO ($568,17 \pm 513,21$ mg/L), la DBO_5 ($6,82 \pm 7,01$ mg/L), les duretés calcique ($0,62 \pm 1,34$ mg/L) et magnésienne ($13,31 \pm 39,55$ mg/L) n'ont pas significativement varié d'un puits à l'autre durant cette étude (**Tableau XIII**).

III.1.1.1.4. Physicochimie des eaux et hydromorphométrie des stations de ZIBO

Dans le site de la Zone Industrielle de Bonabéri (ZIBO), les paramètres abiotiques ont variés d'un puits à l'autre. Ainsi, l'altitude (de 5 m, ZIBOP8 à 15 m, ZIBOP1 ; $p = 1,55 \times 10^{-5}$), la profondeur des puits (de 0,8 m, ZIBOP7 à 3 m, ZIBOP5 ; $p = 1,55 \times 10^{-5}$), l'épaisseur de la couche d'eau (de 20 cm, ZIBOP7 à 280 cm, ZIBOP5 ; $p = 2,3 \times 10^{-4}$), le pH (de 4,19 UC, ZIBOP1 à 14 UC, ZIBOP1 et ZIBOP8 ; $p = 0,00212$), la conductivité électrique (de 772 $\mu\text{S}/\text{Cm}$, ZIBOP1 à 1572 $\mu\text{S}/\text{Cm}$, ZIBOP8 ; $p = 0,00123$), les TDS (de 70 mg/L, ZIBOP4 à 1110 mg/L, ZIBOP8, $p = 0,00478$), la salinité (de 374 ppm, ZIBOP1 à 753 ppm, ZIBOP8; $p = 0,0024$), les nitrites (de 0 mg/L, ZIBOP4 à 0,137 mg/L, ZIBOP7 ; $p = 0,0154$) ont varié significativement d'un puits à l'autre (**Tableau XIV**). Par contre, la température ($26,94 \pm 2,93$ °C), l'Oxygène dissous ($48,44 \pm 9,61$ %), le CO_2 dissous ($31,2 \pm 10,86$ mg/L), l'alcalinité ($7,55 \pm 3,72$ mg/L), l'oxydabilité ($2,12 \pm 2,98$ mg/L), la couleur ($156,75 \pm 224,64$ UPt-Co), les MES ($20,2 \pm 18,95$ mg/L), la turbidité ($20,23 \pm 18,92$ FTU), les nitrates ($2,54 \pm 2,5$ mg/L), les orthophosphates ($0,79 \pm 1,2$ mg/L), l'Azote ammoniacal ($0,15 \pm 0,14$ mg/L), la DCO ($675,2 \pm 342,86$ mg/L), la DBO_5 ($4,9 \pm 3,92$ mg/L), les duretés calcique ($1,7 \pm 4,8$ mg/L) et magnésienne ($7,83 \pm 21,7$ mg/L) n'ont pas significativement varié d'un puits à l'autre durant cette étude (**Tableau XIV**).

Tableau XIII : Valeurs minimales, maximales, moyennes et écart-types des paramètres physicochimiques des eaux souterraines et hydromorphométrique des stations de ZIBA

Stations Paramètres	ZIBAP1		ZIBAP2		ZIBAP3		ZIBAP4		ZIBAP5		ZIBAP6		ZIBAP7		ZIBAP8		ZIBAP9		ZIBAP10		ZIBAP11		ZIBAP12		ZIBAP13		ZIBAP14		ZIBAP15	
	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ
Couche d'eau (cm)	25 50	38,75 ±13,2	40 80	60 ±18,3	25 80	50 ± 29,15	50 105	81,25 ±25,9	15 85	32,5 ± 35	70 120	92,5 ±22,2	110 230	185 ± 51,96	200 230	210 ± 14,14	100 250	187,5 ±62,9	70 190	117,5 ±51,2	130 180	156,3 ±21,4	120 250	197,5 ± 55	100 240	165 ± 75,5	15 65	35 ± 21,21	60 180	117,5 ±49,2
Température (°C)	21,7 28,5	26,23 ±3,09	21,9 28,5	26,48 ±3,07	23 28,7	26,83 ±2,59	23,1 28	26,65 ±2,37	24,5 28,1	26,95 ±1,65	23,6 28,2	26,73 ±2,11	23,3 27,9	26,68 ±2,25	23,6 - 29	27,43 ±2,57	22,7 28,8	26,98 ±2,87	23,5 - 28,8	27,15 ±2,46	22,7 29,5	27,35 ±3,13	22 - 28,4	26,48 ±3,00	22,3 28,9	26,7 ±2,98	22 28,6	26,6 ±3,08	22,3 28,6	26,93 ±3,09
pH (UC)	6,21 6,47	6,40 ±0,12	5,8 6,3	5,97 ±0,23	5,53 5,9	5,71 ±0,15	5,45 14	7,73 ±4,18	5,08 5,71	5,28 ±0,29	4,22 5,42	4,64 ±0,55	3,3 4,71	3,77 ±0,63	5,4 5,67	5,53 ±0,11	5,66 5,93	5,80 ±0,12	5,6 14	7,87 ±4,09	5,28 5,99	5,52 ±0,32	6,23 6,38	6,32 ±0,07	5,3 5,77	5,59 ±0,21	5,99 6,36	6,16 ±0,15	5,4 - 5,9	5,76 ±0,24
Conductivité Electrique (µS/Cm)	893 1103	1032 ±95,2	830 899	859 ± 30,9	1009 1057	1037 ±20,6	1480 1683	1570 ±95,5	963 1103	1011, 8 ±64	1016 1291	1147 ±144	1235 1469	1346 ±125	1028 1280	1203 ±118	1385 1486	1436 ±41,6	1309 1979	1515,8 ±313	1065 1355	1179,8 ±125	1378 1544	1456,5 ±89,9	1082 1232	1172,3 ±63,9	1904 9400	7248,5 ±3572	945 1103	1013,8 ±71,4
TDS (ppm)	633 778	731,5 ±67,2	589 637	609,3 ±21,5	716 747	735,3 ±13,6	1007 1190	1099,3 ± 85,1	684 782	717,8 ±44,9	720 914	812,3 ± 102	872 1050	951,25 ±88,6	729 909	853,75 ±84,8	983 1050	1014 ±28,4	929 1400	1076 ±219,4	755 963	837,75 ±89,3	977 1100	1033,8 ±65,5	790 872	836,5 ±34,2	1350 6680	5150 ±2540	674 783	720,75 ±50,1
Salinité (ppm)	418 545	494 ± 54,26	390 444	409 ± 24,4	476 524	496,5 ±20,2	710 819	765 ± 57,97	454 522	484,3 ±32,7	479 613	548,5 ±65,1	594 708	652,5 ±55,1	485 638	580 ± 66,80	663 747	698 ± 35,38	623 963	736,5 ±153	530 648	567,6 ±54,9	660 780	707,8 ±58,7	528 613	566,8 ± 35	921 5040	3910,3 ± 1996	448 523	485,5 ±31
O2 dissous (% saturation)	40,2 66,7	51,63 ±11	49,5 76	59,13 ±12,4	42,1 62,2	50,85 ±8,44	52,5 63,9	58,65 ±5,25	53,4 66,6	59,05 ±6,35	55,4 69,3	60,73 ±6,02	49,4 82	61,95 ±14,97	46,7 68	56,97 ±10,2	40 62	48,35 ±10,1	39,8 74	57,75 ±14,65	39,8 68	54,35 ±12,7	47,7 84	60,3± 16,79	50 62,8	56,25 ± 6,8	48,3 70	57,37 ±10,3	50,1 66	57,9 ±7,92
CO2 dissous (mg/L)	12,32 33,44	26,4 ±9,64	3,52 33,44	20,24 ±13,97	26,4 33,44	29,48 ±3,01	35,2 70,4	51,91 ±16,8	8,8 35,2	27,28 ±12,4	8,8 45,76	26,4 ±16,5	3,52 54,56	32,12 ±21,4	19,36 51,04	38,72 ±13,9	3,52 40,48	28,16 ±17,1	12,32 36,96	28,7 ±11,3	13,72 26,4	19,27 ±6,36	17,6 36,96	28,6 ±9,13	15,84 29,92	22,44 ± 6,8	28,16 49,28	36,08 ±9,26	3,52 44	24,2 ±16,6
Alcalinité (mg/L)	6 12	8 ± 2,83	4 10	6,5 ± 2,52	2 12	6 ± 4,32	4 20	11 ± 7,39	4 21	10,5 ±9,43	4 18	10 ± 7,12	6 20	12,5 ±6,61	6 26	11 ± 10	4 8	5 ± 2 8	2 24	10 ± 9,66	2 8	5,5 ± 2,52	2 10	6 ± 3,27	4 12	8 ± 3,65	4 18	8 ± 6,73	2 10	7 ± 3,46
Oxydabilité (mg/L)	0,395 0,938	2,22 ±2,03	0,198 3,16	1,284 ±1,35	0,198 0,20	0,988 ±0,93	0,593 4,345	1,827 ±1,73	0,79 3,95	2,37 ±1,61	1,778 6,32	4,25 ±1,95	0,198 2,17	1,087 ±1,04	0,99 2,96	2,07 ±0,95	0,395 3,56	1,93 ±1,35	0,198 2,77	1,037 ±1,18	0,593 2,96	1,827 ±1,05	1,385 2,96	2,025 ±0,71	0,198 1,98	1,086 ±0,83	0,988 8,30	4,098 ±3,12	0,79 4,74	2,913 ±2,02
Couleur (Upt-Co)	17 207	72,25 ±90,7	0 66	36 ± 27,76	5 99	61,75 ±40,9	4 108	51,75 ±53,1	0 95	37 ± 44,6	25 76	48 ± 22,7	46 90	69,75 ±18,2	7 94	52,5 ±40,1	28 101	60,25 ±30,3	21 128	75,25 ±48,6	16 85	62,75 ±32,2	9 52	33,5 ±18,3	13 61	29,75 ±21,6	49 252	127,5 ±97,4	17 95	52,75 ±32,4
MES (mg/L)	1 22	9 ± 9,06	8 17	11,5 ±4,36	2 12	5,75 ±4,35	5 10	7,5 ± 2,08	0 11	4,75 ±4,65	3 17	8 ± 6,22	1 16	9,75 ±6,34	8 10	9 ± 0,82	1 12	4,5 ± 5,07	3 20	10 ± 7,44	6 16	12,25 ± 4,5	8 14	10,25 ±2,63	1 10	4,75 ±3,77	9 50	25,5 ±20,1	4 43	16 ± 18,17
Turbidité (FTU)	0 36	12,75 ±15,95	2 19	11 ± 7,53	0 16	11,25 ± 7,5	2 18	8,5 ± 6,81	0 25	10,75 ±10,4	4 9	7 ± 2,16	9 21	14,75 ±5,06	3 16	8,75 ±5,91	5 30	17 ± 10,3	5 22	13,75 ±8,06	0 6	3,5 ± 2,52	0 15	9 ± 6,98	3 6	4,25 ±1,26	0 77	30,75 ±33,7	1,0 33	11,25 ±14,8
Nitrites (mg/L NO ₂ ⁻)	0,006 0,046	0,019 ±0,02	0,002 0,055	0,019 ±0,02	0,012 0,088	0,036 ±0,04	0,067 0,099	0,082 ±0,01	0,008 0,059	0,032 ±0,03	0,011 0,027	0,021 ±0,01	0,02 0,261	0,088 ±0,12	0,012 0,04	0,024 ±0,01	0,02 0,211	0,076 ±0,09	0,015 0,058	0,037 ±0,02	0,005 0,01	0,009 ± 0,0	0,013 0,061	0,037 ±0,02	0,014 0,019	0,018 ± 0,0	0,017 0,14	0,065 ±0,05	0,019 0,065	0,045 ±0,02
Nitrates (mg/L NO ₃ ⁻)	0 1,4	0,475 ±0,63	0 0,5	0,25 ±0,24	0 1,8	1,175 ±0,81	2,3 5,3	3,9 ± 1,23	0,7 6,1	3,55 ±2,22	0,7 4,4	3,175 ±1,68	2,4 6,6	5 ± 2,02	0,4 1,9	1 ± 0,64	3,3 8,2	5,55 ±2,06	0,9 5,3	3,05 ±2,37	1,6 4	3,15 ±1,11	2 2,9	2,4 ± 0,47	2 5,1	2,925 ±1,47	3,8 7,7	5,95 ±1,95	3,3 6	4,3 ± 1,23
Orthophosphate (mg/L NH ₄ ⁺)	0,198 0,97	0,484 ±0,34	0,054 1,609	0,465 ±0,76	0 4,232	1,107 ±2,08	0,01 3,31	0,965 ±1,57	0,07 2,523	0,771 ±1,18	0,02 3,756	1,12 ±1,78	0 3,26	1,030 ±1,5	0 4,998	1,657 ±2,33	1,64 3,16	2,469 ±0,63	0 6,224	1,659 ±3,05	0 0,436	0,158 ±0,19	0,573 1,53	1,183 ±0,42	0,012 0,21	0,1 ±0,08	0,075 2,3	0,719 ± 1,1	0,02 0,22	0,151 ±0,09
Azote ammoniacal	0 0,11	0,05 ±0,05	0 0,1	0,045 ±0,04	0 0,16	0,073 ±0,08	0,01 0,17	0,095 ±0,08	0,02 0,1	0,06 ±0,04	0 0,13	0,063 ± ,06	0,03 0,1	0,058 ±0,03	0,02 0,12	0,055 ±0,05	0,03 0,2	0,083 ±0,08	0,01 0,12	0,073 ±0,05	0,01 0,16	0,078 ±0,07	0,01 0,09	0,03 ±0,04	0 0,11	0,053 ± ,04	0,02 0,34	0,165 ±0,15	0 0,17	0,053 ±0,08
DCO (mg/L)	223 383	303 ± 113,1	224 449	336,5 ±159	134 691	412,5 ±393,9	202 1648	925 ± 1022	147 1005	576 ± 606,7	42 835	438,5 ±560,7	38 807	422,5 ±543,8	179 1355	767 ± 831,6	32 792	412 ± 537,4	104 1069	586,5 ±682,4	202 1024	613 ± 581,2	246 967	606,5 ±509,8	158 1157	657,5 ±706,4	210 1924	1067 ± 1212	204 594	399 ± 275,8
Dureté Calcique (mg/L)	3,0 4	3,67 ±0,58	1 8	4 ± 3,61	1 40	17,67 ±20,1	2 11	5,67 ±4,73	6 9	7,67 ±1,53	1 14	6,33 ±6,81	1 11	6,33 ±5,03	1 16	8,67 ±7,51	5 25	12 ± 11,27	3 10	6,67 ±3,51	1 10	5 ± 4,58	1 12	6 ± 5,57	1 8	5,33 ±3,79	3 5	4,33 ±1,15	1 7	3 ± 3,46
Dureté Magnésienne (mg/L)	0 7,8	1,998 ±3,87	0 1,17	0,323 ±0,57	0,04 3,49	0,983 ±1,67	0 5	1,33 ±2,45	0 0,6	0,208 ±0,28	0 0,99	0,298 ±0,47	0 1,07	0,4 ± 0,51	0 0,73	0,273 ±0,35	0 0,49	0,18 ±0,23	0 0,7	0,193 ±0,34	0 2,4	0,668 ±1,16	0 0,25	0,14 ±0,11	0 3,2	1,41 ±1,54	0 1,13	0,635 ±0,52	0 1,14	0,315 ±0,55

Tableau XIV : Valeurs minimales, maximales, moyennes et écart-types des paramètres physicochimiques des eaux souterraines et hydromorphométrique des stations de ZIBO

Stations Paramètres	ZIBOP1		ZIBOP2		ZIBOP3		ZIBOP4		ZIBOP5		ZIBOP6		ZIBOP7		ZIBOP8		ZIBOP9		ZIBOP10	
	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ	Min Max	Moy ± σ
Couche d'eau (cm)	115 160	143,75 ± 19,7	130 215	186,25 ± 38,2	100 210	173,75 ± 50,2	40 80	61,25 ± 21,7	210 280	257,5 ± 33	25 120	83,75 ± 42,7	20 55	35 ± 14,7	105 160	143,75 ± 26,3	80 140	120 ± 27,1	87 110	101,75 ± 10,9
Température (°C)	23,2 28,8	27,18 ± 2,66	23,2 29,8	27,7 ± 3,04	23,2 29,7	27,73 ± 3,06	22,1 29	26,3 ± 3,07	22,2 30,3	27,33 ± 3,55	21,3 29,1	26,25 ± 3,45	21,6 29,4	26,65 ± 3,47	21,4 30,4	27,18 ± 4,07	21,9 28,6	26,65 ± 3,18	21,9 28,5	26,48 ± 3,07
pH (UC)	4,19 14	6,92 ± 4,73	4,8 5,2	5,06 ± 0,18	4,63 4,87	4,75 ± 0,12	5,43 5,94	5,60 ± 0,24	5,72 5,77	5,75 ± 0,02	4,76 6,29	5,81 ± 0,71	6,42 6,78	6,58 ± 0,19	6,12 14	8,17 ± 3,89	5,63 5,68	5,65 ± 0,02	5,56 5,72	5,64 ±0,07
Conductivité Electrique (µS/Cm)	772 814	797 ± 17,83	1050 1088	1068,5 ± 17,18	817 944	866 ± 55,93	953 1058	992,5 ± 48,13	902 1124	990,25 ± 100,3	1084 1271	1200,5 ± 89,65	953 1234	1125,5 ± 121,3	952 1572	1357,5 ± 279,6	1015 1318	1184,25 ± 125,4	1001 1489	1248 ± 219,92
TDS (ppm)	545 577	564,75 ± 13,82	745 772	758,25 ± 12,42	579 670	614,5 ± 39,84	70 752	544,75 ± 318,4	640 798	703 ± 71,43	770 902	852 ± 63,02	677 876	798,75 ± 85,77	676 1110	962 ± 196,86	721 935	840,25 ± 88,51	491 1060	831,5 ± 249,92
Salinité (ppm)	374 381	377 ± 2,94	496 526	509,75 ± 13,77	383 445	412 ± 28,96	450 502	474,75 ± 21,31	424 534	473,5 ± 46,08	513 606	577,5 ± 43,97	450 617	542 ± 69,23	449 753	655 ± 139,36	504 621	567 ± 48,05	401 712	576 ± 136,68
O2 dissous (% saturation)	41,9 60,4	51,73 ± 7,9	42 59,4	47,85 ± 7,92	46,8 62,1	51,78 ± 7,03	45 59,3	49,48 ± 6,69	38,8 60,9	50,13 ± 9,49	15 59,2	38,38 ± 18,29	43,5 59	50,53 ± 6,63	35 59,1	44,1 ± 11,49	45,5 60,2	51,33 ± 6,26	37 64,1	49,08 ± 11,38
CO2 dissous (mg/L)	19,36 44	31,24 ± 10,30	17,6 38,72	33 ± 10,30	22,88 40,48	35,64 ± 8,55	26,4 45,76	38,72 ± 8,50	19,36 44	34,76 ± 10,88	21,12 - 36,96	27,72 ± 6,64	14,08 - 35,2	21,56 ± 8,18	14,08 - 35,2	26,4 ± 8,97	15,84 52,8	36,96 ± 15,81	10,56 44	25,96 ± 15,50
Alcalinité (mg/L)	4 12	8 ± 3,65	4 8	5,5 ± 1,91	2 20	9,5 ± 7,55	4 8	6,5 ± 1,91	4 10	6,5 ± 3	4 12	7 ± 3,83	6 10	7,5 ± 1,91	8 14	9,5 ± 3	4 10	6,5 ± 2,52	6 18	9 ± 6
Oxydabilité (mg/L)	0,59 3,56	1,83 ± 1,33	0,59 1,57	0,99 ± 0,48	0,40 1,38	0,99 ± 0,42	0,20 3,36	1,68 ± 1,38	0,40 0,99	0,59 ± 0,28	0,79 15,8	5,33 ± 7,06	0,59 5,33	2,27 ± 2,12	0,59 11,65	4,79 ± 4,78	0,40 3,16	1,68 ± 1,15	0,40 1,78	1,04 ± 0,75
Couleur (Upt-Co)	16 109	54,5 ± 40,60	22 122	54,75 ± 45,84	8 115	57,75 ± 46,56	14 120	49 ± 49,75	68 188	117,5 ± 50,63	50 850	530 ± 361,39	0 964	296,5 ± 449,64	56 354	186 ± 132,97	15 233	116,5 ± 97,63	5 192	105 ± 89,51
MES (mg/L)	3 18	13,25 ± 6,95	3,0 16	9 ± 5,72	0 21	10,5 ± 9,33	3 14	7,5 ± 5,07	7 23	15,25 ± 6,65	9 80	51,5 ± 32,64	0 44	21,25 ± 19,92	7 51	28 ± 20,49	1 45	22,5 ± 20,47	11 35	23,25 ± 10,78
Turbidité (FTU)	3 18	12 ± 7,35	1 22	10,25 ± 10,87	0 19	6,5 ± 8,50	2 13	8 ± 4,97	5 44	21,25 ± 16,86	16 82	44,25 ± 27,86	1 43	15,5 ± 19,16	7 62	31 ± 24,37	1 38	19 ± 17,38	17 45	34,5 ± 12,56
Nitrites (mg/L NO₂⁻)	0,009 0,034	0,021 ± 0,010	0,005 0,013	0,009 ± 0,007	0,01 0,023	0,017 ± 0,006	0 0,014	0,008 ± 0,006	0,012 0,022	0,016 ± 0,005	0,004 0,06	0,039 ± 0,025	0,026 0,137	0,081 ± 0,045	0,008 0,055	0,034 ± 0,019	0,009 0,034	0,023 ± 0,010	0,018 0,034	0,027 ± 0,007
Nitrates (mg/L NO₃⁻)	0,8 4,6	2,35 ± 1,61	1,3 5,6	3,45 ± 1,92	0,1 3,4	1,75 ± 1,52	0 3,2	1,7 ± 1,31	0 3,1	1,05 ± 1,39	0 8	4,23 ± 3,29	0 4,7	1,65 ± 2,22	0,1 10,4	5,43 ± 4,68	0 5	1,88 ± 2,21	0 4,1	1,75 ± 1,75
Orthophosphates (mg/L PO₄³⁻)	0,01 1,415	0,40 ± 0,68	0,002 0,71	0,24 ± 0,33	0 2,871	0,97 ± 1,35	0 3,206	0,87 ± 1,56	0 3,119	0,80 ± 1,55	0,003 3,764	1,08 ± 1,80	0,32 1,611	0,80 ± 0,57	0,09 4,18	1,21 ± 1,98	0,03 2,699	0,81 ± 1,26	0,021 2,464	0,71 ± 1,18
Azote ammoniacal (mg/L NH₄⁺)	0,04 0,16	0,09 ± 0,05	0 0,23	0,09 ± 0,11	0 0,16	0,045 ± 0,08	0,02 0,19	0,09 ± 0,08	0,07 0,35	0,18 ± 0,12	0,09 0,44	0,313 ± 0,16	0,02 0,21	0,103 ± 0,08	0,08 0,6	0,305 ± 0,26	0,07 0,29	0,155 ± 0,09	0,08 0,24	0,135 ± 0,07
DCO (mg/L)	229 1015	622 ± 555,79	222 1158	690 ± 661,85	278 976	627 ± 493,56	492 598	545 ± 74,95	588 592	590 ± 2,83	915 1450	1182,5 ± 378,3	740 839	789,5 ± 70	414 1087	750,5 ± 475,88	246 484	365 ± 168,29	500 681	590,5 ± 127,99
Dureté Calcique (mg/L)	1 5	3,33 ± 2,08	2 5	3,33 ± 1,15	4 5	4,67 ± 0,58	4 16	9,33 ± 6,11	4 16	8,33 ± 6,66	3 9	5,67 ± 3,06	1 5	3 ± 2	2 5	3,33 ± 1,53	1 3	2 ± 1	1 13	6 ± 6,24
Dureté Magnésienne (mg/L)	0 3,6	0,95 ± 1,77	0 0,37	0,12 ± 0,17	0 1,22	0,63 ± 0,65	0 3	0,83 ± 1,45	0 0,69	0,41 ± 0,29	0 9,4	2,73 ± 4,48	0 1,33	0,57 ± 0,66	0,21 29,4	8,2 ± 14,16	0,2 1,7	0,77 ± 0,66	0,26 4,02	1,73 ± 1,66

III.1.1.2. Caractérisation physicochimique de l'eau et hydromorphométrie en fonction des sites d'étude

Les variations spatiales et saisonnières (par site et par saison) des valeurs des paramètres physicochimiques sont présentées dans les figures 16 à 21.

III.1.1.2.1. Variations de la couche d'eau et de la température

L'épaisseur de la couche d'eau a présenté des valeurs significativement différentes entre les saisons ($p < 0,01$) avec les plus fortes valeurs enregistrées durant la saison des pluies (**Figure 16A**). Le site de PK 21 a présenté les plus fortes valeurs moyennes ($190,75 \pm 76,23$ cm), alors que les plus faibles ont été obtenues dans les stations de Cité SIC ($107,5 \pm 59,48$ cm).

Les valeurs de la température ont très significativement varié d'une saison à l'autre ($p < 0,001$) avec les plus fortes valeurs enregistrées durant la saison sèche (**Figure 16 B**). Les eaux souterraines les plus chaudes sont celles de Cité SIC avec une moyenne de $29,4 \pm 1^\circ\text{C}$ et puis celles des zones industrielles ZIBO ($28,98 \pm 0,75^\circ\text{C}$) et ZIBA ($28,27 \pm 0,51^\circ\text{C}$), alors que les eaux les plus froides sont celles de Ndogbong durant la saison de pluies ($23,4 \pm 2,05^\circ\text{C}$) suivies de celles du site périurbain de PK 21 ($26,16 \pm 2,02^\circ\text{C}$). Le test U de Mann-Whitney montre des différences significatives entre les valeurs de température enregistrées entre les sites de PK 21 et ZIBA ($p < 0,01$) et entre les sites de PK 21 et ZIBO ($p < 0,05$).

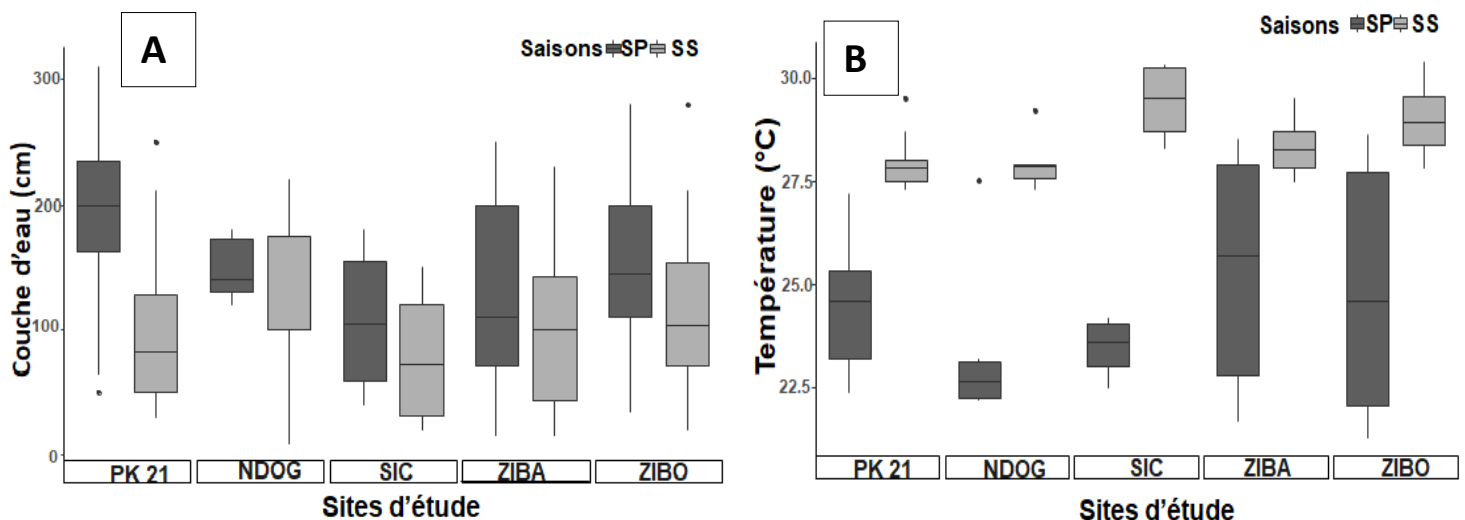


Figure 16: Variations spatiales et saisonnières de la couche d'eau (A) et de la température (B) dans les différents sites durant la période de l'étude

III.1.1.2.2. Variations de la couleur, des MES, de la turbidité, de la conductivité électrique, des TDS et de la salinité

Les profils de variation de la couleur, des Matières En Suspension (MES) et de la turbidité sont similaires (**Figures 17 A, B, C**). Les valeurs de ces paramètres sont très significativement différentes d'une saison à l'autre ($p < 0,01$) avec les plus fortes valeurs obtenues durant la saison sèche dans tous les sites.

Le site de Cité SIC présente la plus faible valeur moyenne de couleur ($3,5 \pm 5,5$ UPt.Co) obtenue durant la saison de pluies alors que la plus forte valeur ($162,8 \pm 196,32$ UPt.Co) a été obtenue à ZIBO pendant la saison sèche (**Figure 17 A**). Le test U de Mann-Whitney montre que les valeurs de Couleur enregistrées dans la zone périurbaine de PK 21 sont significativement différentes de celles de Cité SIC et de ZIBA ($p < 0,05$) et de celles de ZIBO ($p < 0,01$). Ces valeurs de Couleur sont également significativement différentes ($p < 0,01$) entre le site de Ndogbong et les zones industrielles (ZIBA et ZIBO) et aussi entre le site de Cité SIC et ces mêmes zones industrielles. Les valeurs obtenues dans les zones industrielles sont aussi significativement différentes entre elles ($p < 0,05$).

Les MES ont été plus faibles à PK 21 ($5,25 \pm 4,88$ mg/L) pendant la saison de pluies alors qu'elles sont les plus élevées à ZIBO ($21,15 \pm 19,49$ mg/L) pendant la saison sèche (**Figure 17 B**). Le test U de Mann-Whitney montre des différences significatives entre les valeurs enregistrées à ZIBO et les sites de PK 21 et ZIBA ($p < 0,01$) et celui de Cité SIC ($p < 0,05$).

Les eaux souterraines de Ndogbong sont les moins turbides ($0,17 \pm 0,41$ FTU, enregistrée pendant la saison de pluies) tandis que les sites des zones industrielles (ZIBA et ZIBO) présentent les eaux les plus turbides pendant toute la période d'étude (**Figure 17 C**). Le test U de Mann-Whitney montre des différences significatives ($p < 0,01$) entre les valeurs de turbidité enregistrées dans le site périurbain de PK 21 et les sites urbains industrialisés (ZIBA et ZIBO). Des différences significatives ont également été enregistrées entre les sites de ZIBO et Ndogbong ($p < 0,01$) et aussi entre le site de ZIBO et ceux de Cité SIC et ZIBA ($p < 0,05$).

La conductivité électrique, les TDS et la salinité ont des profils de variation similaires avec des valeurs relativement élevées dans l'ensemble des sites prospectés durant la période de l'étude (**Figures 17D, E et F**) et ne présentant aucune différence significative entre les saisons au test de Wicolxon ($p > 0,05$). Les valeurs de ces paramètres augmentent de la zone périurbaine aux zones industrielles où l'on enregistre les plus fortes valeurs. Ainsi, les plus faibles valeurs moyennes sont observées dans le site de PK 21 ($604,89 \pm 137,4$ μ S/cm, $417,03 \pm 116,44$ ppm et $277,38 \pm 77,46$ ppm respectivement) et les valeurs moyennes les plus élevées ont été enregistrées dans la zone industrielle de ZIBA ($1615,28 \pm 1734,02$ μ S/cm, $1145,27 \pm 1232,49$

ppm et $806,82 \pm 956,92$ ppm respectivement). Les valeurs de ces trois paramètres sont significativement différentes ($p < 0,01$) au test U de Mann-Whitney entre le site de PK 21 et les autres sites, entre le site de Ndogbong et les deux zones industrielles (ZIBA et ZIBO) et également entre ces zones industrielles.

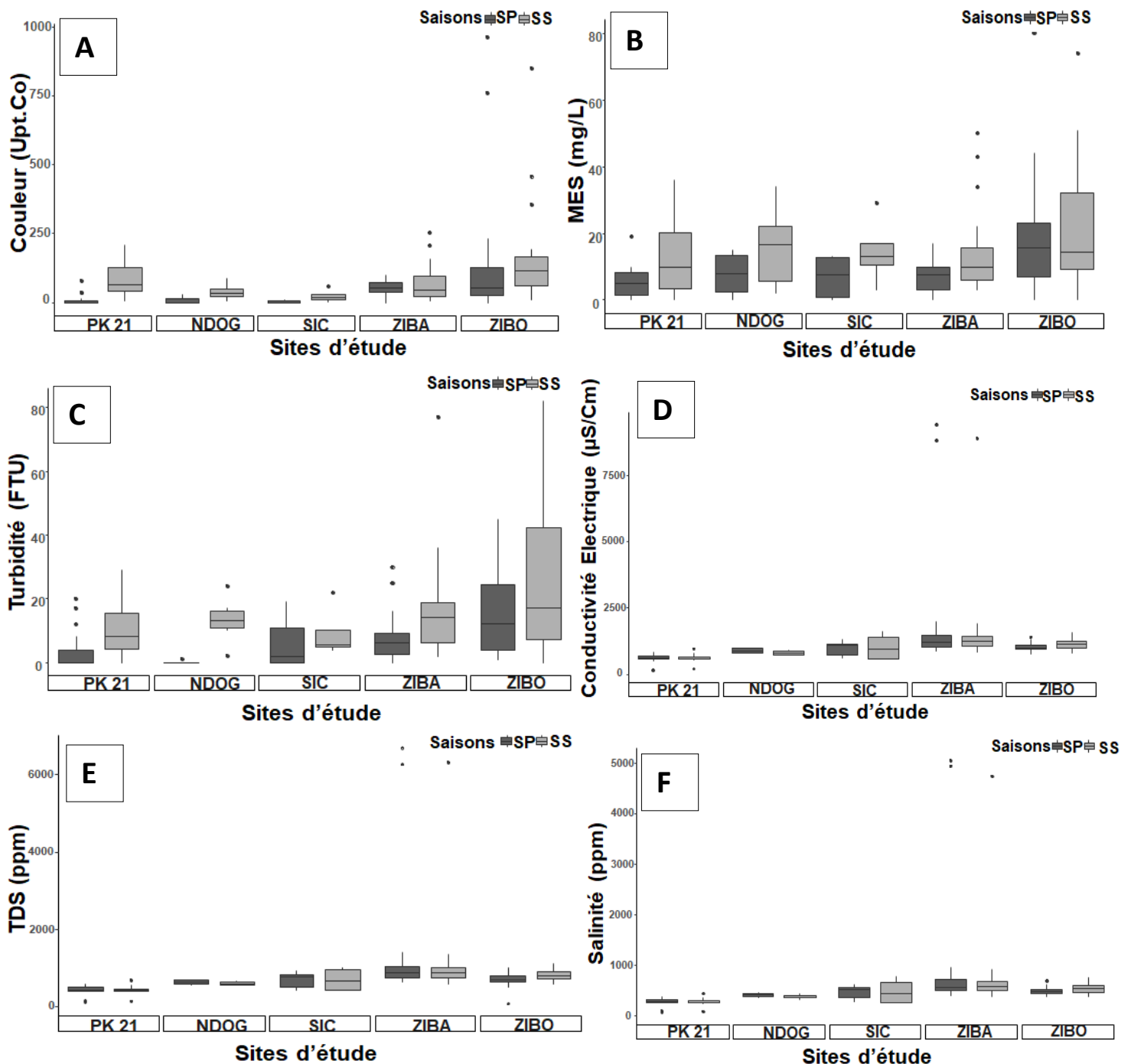


Figure 17 : Variations spatiales et saisonnières de la couleur (A), des MES (B), de la turbidité (C), de la conductivité électrique (D), des TDS (E) et de la salinité (F) durant la période de l'étude.

III.1.1.2.3. Variations des formes d'azote et des orthophosphates

Les profils de variation de l'Azote ammoniacal et des nitrates sont similaires avec des teneurs présentant au test de Wicolxon des différences significatives ($p < 0,01$) d'une saison à l'autre, les plus fortes valeurs ayant été obtenues durant la saison sèche (**Figures 18 A, C**). Les teneurs moyennes en Azote ammoniacal ont été plus élevées à ZIBO ($0,18 \pm 0,14$ mg/L) et à PK 21 ($0,10 \pm 0,08$ mg/L) durant la saison sèche. Le test U de Mann-Whitney a montré que ces valeurs sont significativement différentes entre le site de ZIBO et les sites de PK 21 et de ZIBA ($p < 0,01$) et également entre le site de ZIBO et le site de Cité SIC ($p < 0,05$). Les teneurs en nitrates ont été faibles dans tous les sites. Néanmoins, les plus fortes valeurs ont été enregistrées à ZIBO ($3,43 \pm 2,30$ mg/L) et à ZIBA ($3,41 \pm 2,23$ mg/L). Le test U de Mann-Whitney a montré des différences significatives entre les teneurs en nitrates de la zone périurbaine de PK 21 et celles des zones industrielles de ZIBA ($p < 0,01$) et de ZIBO ($p < 0,05$). Des différences significatives ($p < 0,01$) ont également été observées entre le site de ZIBA et les sites de Ndogbong et de Cité SIC.

L'évolution des concentrations en nitrites dans les sites d'étude montre une faible valeur moyenne ($0,007 \pm 0,02$ mg/L) dans le site de PK 21 et des valeurs relativement élevées dans les autres sites avec la plus forte concentration ($0,11 \pm 0,21$ mg/L) enregistrée dans le site de Cité SIC (**Figure 18 B**). Le test U de Mann-Whitney montre des différences significatives ($p < 0,01$) entre les valeurs obtenues entre le site périurbain de PK 21 et les autres sites. En outre, ces teneurs en nitrites n'ont présenté aucune différence significative au test de Wicolxon ($p > 0,05$) entre les saisons.

Les teneurs en orthophosphates sont significativement différentes entre les saisons ($p < 0,05$) avec les plus fortes valeurs enregistrées pendant la saison sèche à l'exception des sites de Cité SIC et de Ndogbong où l'on enregistre les plus fortes valeurs plutôt en saison de pluies (**Figure 18 D**). Les sites PK 21 ($1,32 \pm 1,35$ mg/L), ZIBA ($1,31 \pm 1,74$ mg/L) et ZIBO ($1,36 \pm 1,48$ mg/L) présentent les plus fortes teneurs moyennes, toutes enregistrées pendant la saison sèche. Le test U de Mann-Whitney n'a montré aucune différence significative ($p > 0,05$) entre les teneurs en Orthophosphates dans les sites d'étude.

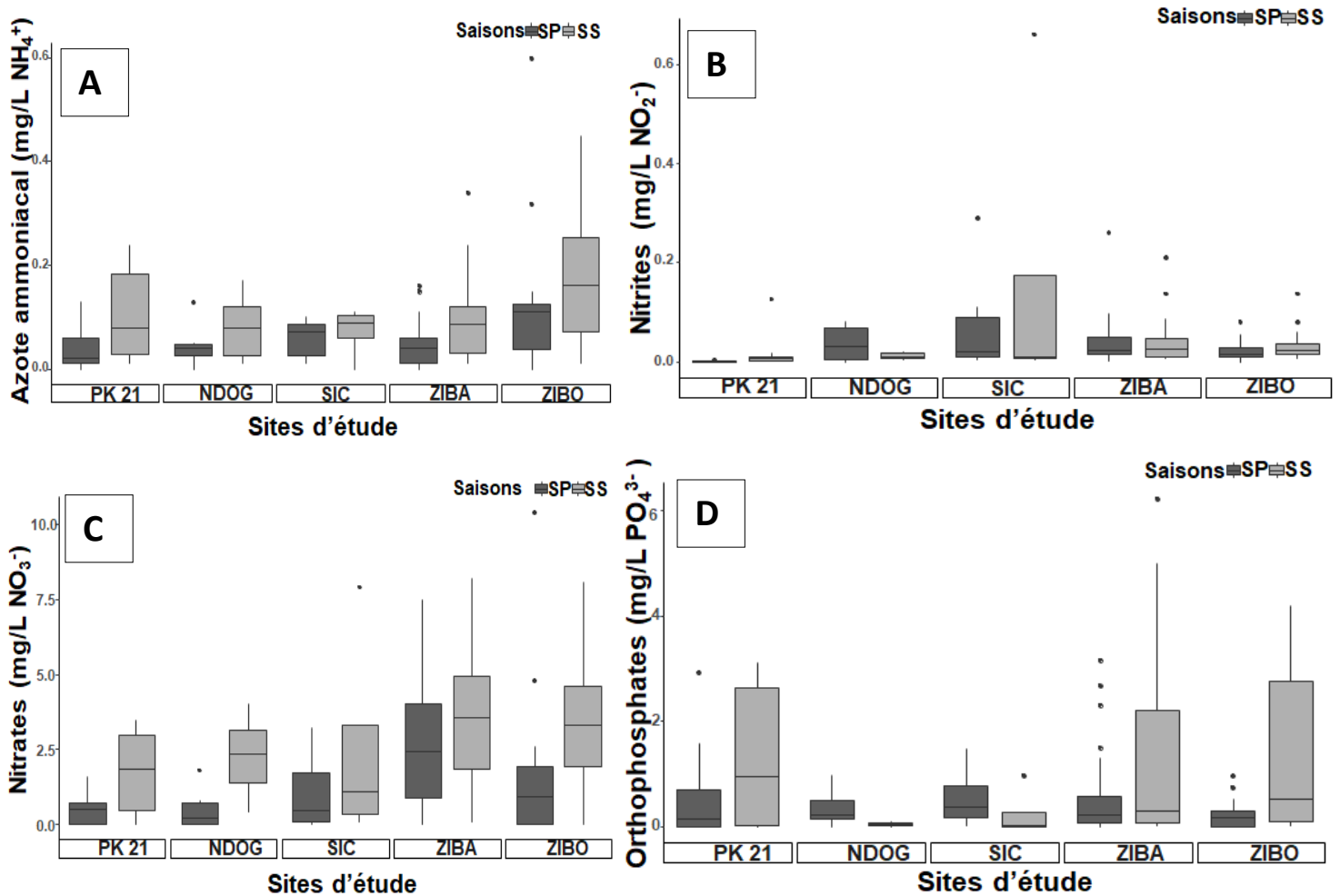


Figure 18 : Variations spatiales et saisonnières de l’Azote ammoniacal (A), des nitrites (B), des nitrates (C) et des orthophosphates (D) dans les sites d’études durant la période de l’étude.

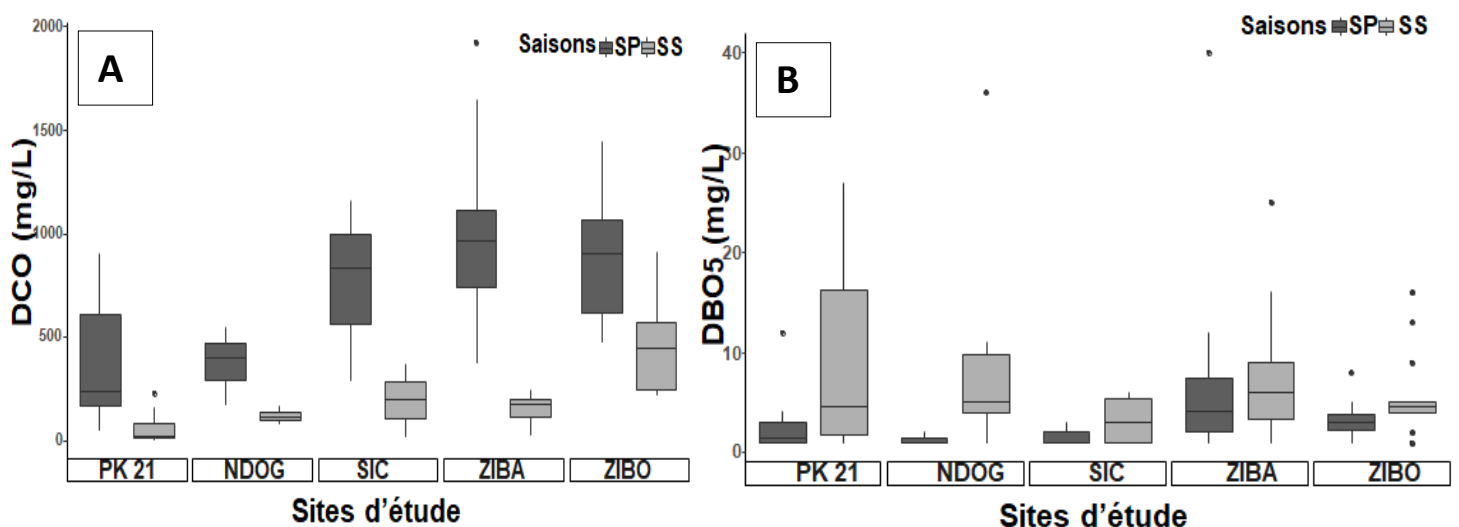
III.1.1.2.4. Variations de la DCO, de la DBO₅, de la saturation en Oxygène et de l’Oxydabilité

La demande chimique en oxygène (DCO) et la demande biochimique en oxygène pendant 5 jours (DBO₅) ont des profils de variation inversement proportionnels et sont très significativement différentes ($p < 0,01$) d’une saison à l’autre (**Figures 19 A et B**). Les valeurs moyennes de la DCO ont été plus élevées pendant la saison des pluies dans tous les sites avec les plus fortes valeurs obtenues dans les sites de Cité SIC ($765,33 \pm 438,29$ mg/L), de ZIBO ($887,6 \pm 304,55$ mg/L) et de ZIBA ($980 \pm 406,38$ mg/L). La plus faible valeur moyenne ayant été obtenue à PK 21 ($64,8 \pm 77,8$ mg/L). Les valeurs de DCO enregistrées dans la zone périurbaine de PK 21 ont été significativement plus faibles ($p < 0,01$) par rapport à celles obtenues dans les sites de Cité SIC, de ZIBA et ZIBO et sont presque similaires ($p > 0,05$) à celles de Ndogbong. Le test U de Mann-Whitney a également montré des différences

significatives ($p < 0,05$) entre les valeurs de la DCO obtenues dans le site de ZIBO et ceux de Ndogbong et de ZIBA. Par contre les valeurs moyennes de la DBO_5 ont été plus élevées pendant la saison sèche dans tous les sites avec les plus fortes valeurs moyennes ($10,33 \pm 13$ mg/L) enregistrées à Ndogbong. Ces valeurs de DBO_5 n'ont montré de différence significative ($p < 0,05$) qu'entre le site de Cité SIC et les sites industriels (ZIBA et ZIBO).

Le profil de la saturation en Oxygène dissous a varié entre les sites durant la période d'étude et présente un gradient décroissant (**Figure 19C**) et aucune différence significative ($p > 0,05$) n'a été notée entre les saisons au test de Wilcoxon. Les eaux souterraines de la zone périurbaine de PK 21 sont plus oxygénées avec des taux de saturation variant entre 51% et 88% pour une moyenne de $67,13 \pm 9,52\%$. Par contre dans les zones urbaines et industrialisées, les eaux souterraines sont relativement moins oxygénées avec les plus faibles taux de saturation enregistrés à Cité SIC ($47,01 \pm 13,83\%$) et à ZIBO ($48,44 \pm 9,61\%$). Le test U de Mann-Whitney montre des différences très significatives ($p < 0,01$) entre les valeurs obtenues dans le site de PK 21 et les autres sites et également entre les valeurs obtenues dans les deux zones industrielles (ZIBA et ZIBO). Des différences significatives ($p < 0,05$) ont également été obtenues entre les valeurs enregistrées dans le site de ZIBA et les sites de Ndogbong et Cité SIC.

Les valeurs de l'oxydabilité sont relativement similaires sur le plan saisonnier dans tous les sites prospectés (**Figure 19 D**). Néanmoins, ces valeurs restent plus élevées dans le site de PK 21 ($2 \pm 2,09$ mg/L d' O_2) à ZIBA ($2,07 \pm 1,70$ mg/L d' O_2) et ZIBO ($2,12 \pm 2,98$ mg/L d' O_2). Aucune différence significative ($p > 0,05$) n'a été notée entre les différents sites au test U de Mann-Whitney.



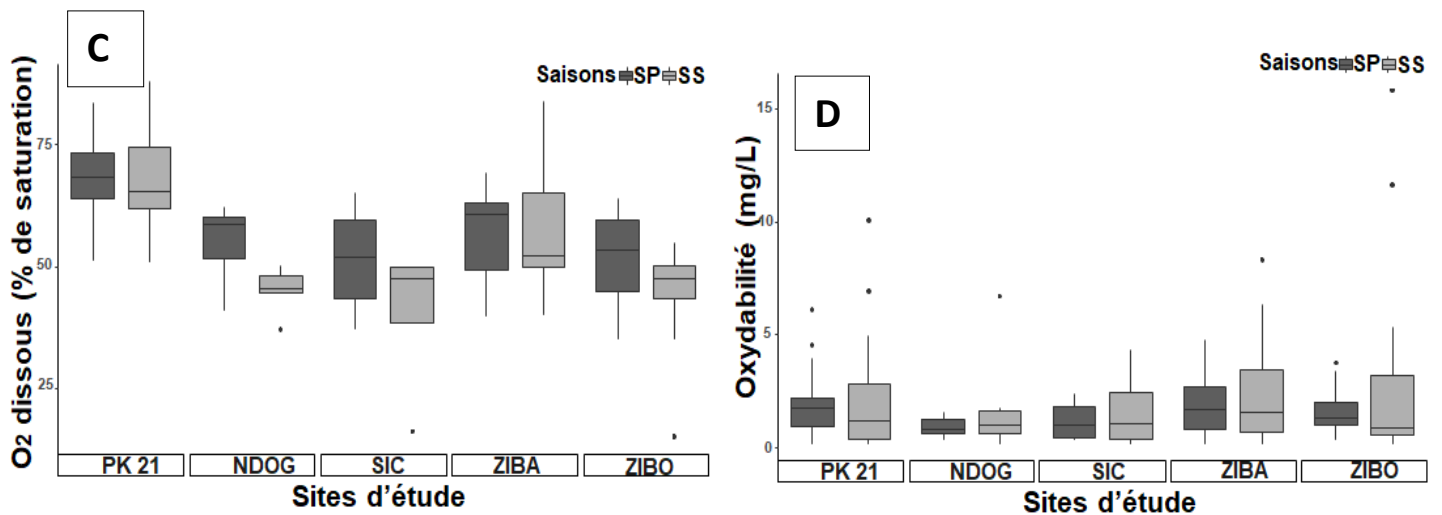


Figure 19 : Variations spatiales et saisonnières de la DCO (A), de la DBO₅ (B), de la Saturation en Oxygène dissous (C) et de l'oxydabilité (D) dans les sites d'étude durant la période de l'étude.

III.1.1.2.5. Variations du pH, du CO₂ dissous et de l'alcalinité

Les eaux souterraines de la ville de Douala sont acides (**Figure 20 A**). Cependant, les plus faibles valeurs du potentiel d'Hydrogène (pH) sont enregistrées dans la zone périurbaine de PK 21 ($4,24 \pm 0,38$ UC). Ces valeurs augmentent progressivement dans les autres sites et atteignent leur maximum dans les eaux souterraines des zones urbaines industrialisées de ZIBA ($5,87 \pm 1,76$ UC) et de ZIBO ($5,99 \pm 1,96$ UC). Le test U de Mann-Whitney montre une différence très significative ($p < 0,01$) entre les valeurs obtenues entre le site de PK 21 et les autres sites et également une différence significative ($p < 0,05$) entre le site de Ndogbong et ZIBA. Cependant, aucune différence significative ($p > 0,05$) n'a été enregistrée entre les valeurs obtenues entre les autres sites. Le test de Wilcoxon n'a montré aucune différence significative ($p > 0,05$) entre les saisons.

Les teneurs en CO₂ dissous ont également été très significativement différentes ($p < 0,01$) entre les saisons au test de Wilcoxon ; les plus fortes teneurs ayant été obtenues pendant la saison sèche excepté pour les eaux souterraines de Cité SIC où les teneurs ont été plus importantes en saison de pluies (**Figure 20 B**). Globalement, les eaux de la zone d'étude sont faiblement riches en CO₂ dissous. Les eaux de la zone périurbaine de PK 21 sont relativement moins riches en CO₂ dissous que les eaux des zones urbaines industrialisées. En effet, des différences significatives entre les valeurs de ce paramètre ont été observées au test U de Mann-Whitney, entre le site de PK 21 et ceux de Ndogbong et Cité SIC ($p < 0,05$) et également entre PK 21 et les sites de ZIBA et ZIBO ($p < 0,01$). Des différences significatives ont également été enregistrées entre le site de Ndogbong et les sites de ZIBA et ZIBO ($p < 0,05$).

Les valeurs de l'alcalinité ont varié très significativement d'une saison à l'autre ($p < 0,01$) avec les plus fortes valeurs enregistrées pendant la saison de pluies dans tous les sites (**Figure 20 C**). Ces valeurs n'ont montré aucune différence significative ($p > 0,05$) entre les différents sites au test U de Mann-Whitney.

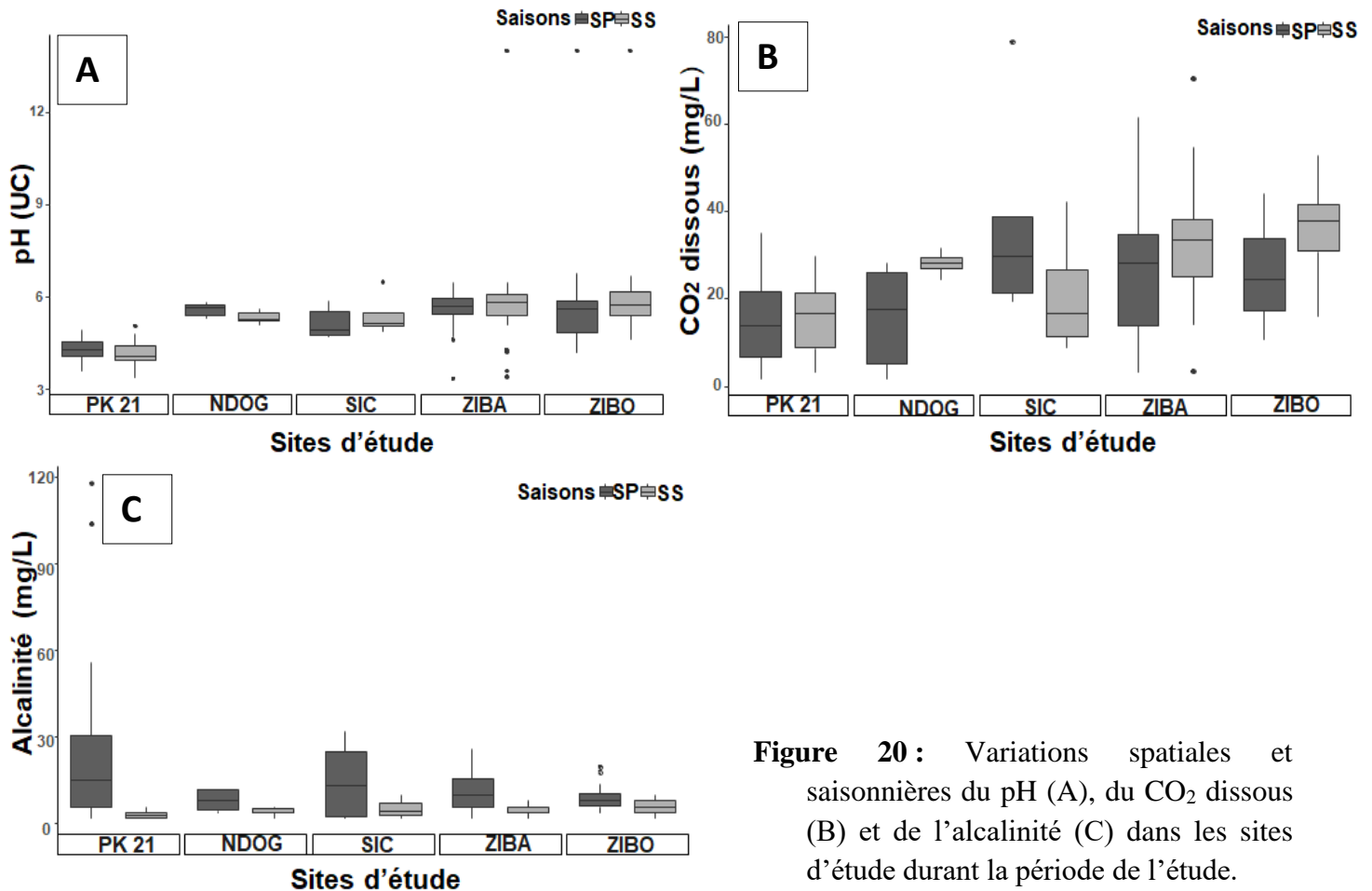


Figure 20 : Variations spatiales et saisonnières du pH (A), du CO₂ dissous (B) et de l'alcalinité (C) dans les sites d'étude durant la période de l'étude.

III.1.1.2.6. Variations des durétés calcique et magnésienne

Les duretés calcique ($p < 0,01$) et magnésienne ($p < 0,05$) ont été significativement différentes d'une saison à l'autre (**Figures 21 A et B**) et plus faibles dans tous les sites. Durant toute la période de l'étude, les valeurs moyennes de ces paramètres ont été plus importantes en saison sèche dans tous les sites avec les plus fortes valeurs moyennes enregistrées dans les sites urbains industrialisés et les plus faibles dans le site périurbain de PK 21. Les valeurs de la dureté calcique de PK 21 sont significativement différentes de celle enregistrées à Ndogbong ($p < 0,05$) et de celles obtenues à ZIBO ($p < 0,01$). Des différences significatives ($p < 0,05$) ont également été obtenues entre les valeurs enregistrées dans les zones industrielles (ZIBA et ZIBO). Les valeurs de la dureté magnésienne n'ont par contre été significativement différentes ($p < 0,05$) qu'entre Ndogbong et ZIBA.

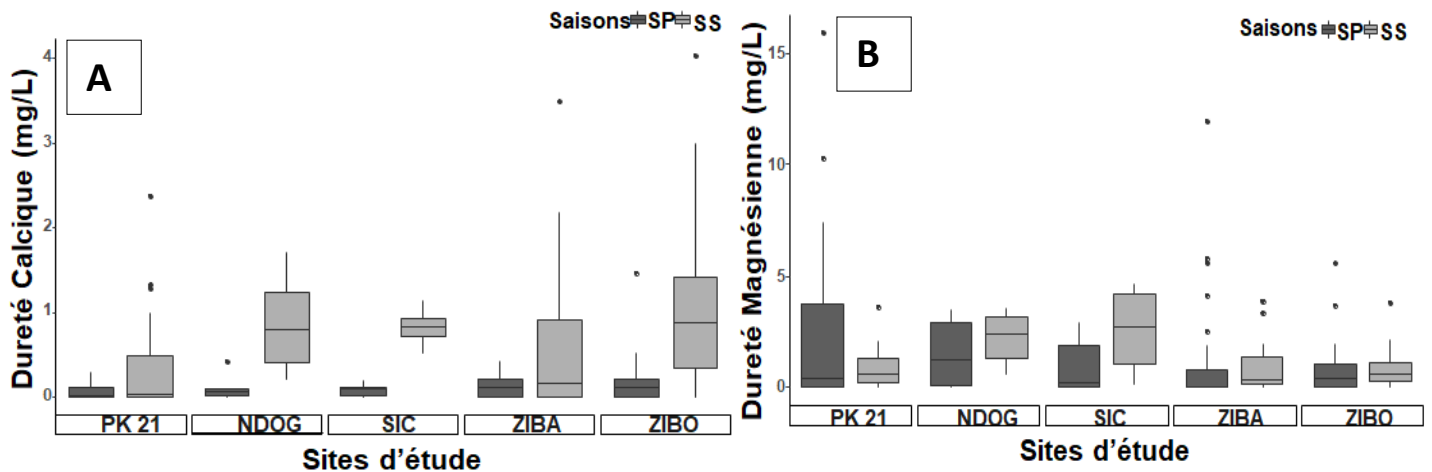


Figure 21 : Variations spatiales et saisonnières des duretés calcique (A) et magnésienne (B) dans les sites d'étude durant la période de l'étude.

III.1.1.3. Variations spatiales et saisonnières des éléments traces métalliques (ETM) et autres métaux

Les teneurs en Eléments Traces Métalliques (ETM) ont varié d'un site à l'autre et d'une saison à l'autre. Globalement, les teneurs en ETM et autres métaux mesurés ont été les plus élevées dans les eaux souterraines des zones industrielles (ZIBA et ZIBO) avec les plus fortes valeurs enregistrées à ZIBO ; les plus faibles valeurs ayant été obtenues dans la zone périurbaine de PK 21 (Tableau IX). Sur le plan saisonnier, les teneurs les plus élevées ont été enregistrées durant la saison sèche pour la plupart des ETM et autres métaux mesurés.

Les teneurs moyennes en plomb ont été plus élevées dans les zones industrielles (ZIBA et ZIBO) ; la plus forte valeur moyenne ($1,019 \pm 3,593$ mg/L) ayant été obtenue à ZIBA pendant la saison des pluies. Le test U de Mann-Whitney indique des différences très significatives ($P < 0,01$) entre les données enregistrées à PK 21 et celles de ZIBA et ZIBO. Des différences très significatives ($p < 0,01$) ont également été obtenues d'une part entre le site de ZIBO et les sites de ZIBA, Cité SIC et Ndogbong et d'autre part entre le site de ZIBA et les sites de Ndogbong et Cité SIC. Aucune différence significative ($p > 0,05$) n'a été obtenue entre le site de PK 21 et les sites de Cité SIC et Ndogbong.

Les teneurs moyennes en cadmium, nickel, zinc, arsenic, et en fer ont été les plus élevées à ZIBO, tandis que celles en cuivre et manganèse ont été les plus fortes à Ndogbong et les teneurs moyennes en chrome ont été plus élevées à Cité SIC (**Tableau XV**). Le test U de Mann-Whitney a montré des différences très significatives ($p < 0,01$) entre les teneurs enregistrées à PK 21 et celles obtenues dans les autres sites pour ces ETM.

D'autres métaux mesurés durant la période de l'étude (Sn, Po, Co, B, Si, Sb, K) ont également présenté des plus fortes valeurs dans le site industriel de ZIBO à l'exception du baryum et du sodium qui ont respectivement été plus élevées à Ndogbong et à Cité SIC (**Tableau XV**).

Tableau XV : Valeurs moyennes saisonnières et écart-types des Eléments Traces Métalliques et d'autres métaux mesurés dans l'eau des différents sites pendant la période d'étude.

Sites Métaux (mg/L)	PK 21		NDOG.		SIC		ZIBA		ZIBO	
	SP	SS	SP	SS	SP	SS	SP	SS	SP	SS
Plomb (Pb)	0,009±0,016	0,026±0,035	0,007±0,006	0,011±0,002	0,001±0,002	0,012±0,003	1,019±3,593	0,088±0,113	0,180±0,239	0,391±0,423
Cadmium (Cd)	0,029±0,035	0,214±0,193	0,113±0,121	0,817±1,285	0,147±0,159	1,200±1,556	0,210±0,265	0,443±0,498	1,198±1,222	2,860±3,441
Chrome (Cr)	0,001±0,003	0,001±0,003	0,007±0,006	0,139±0,169	0,873±0,784	0,015±0,007	0,185±0,195	0,092±0,157	0,19±0,305	0,401±0,311
Cuivre (Cu)	0,004±0,007	0,004±0,006	0,797±0,704	0,433±0,500	0,206±0,100	0,170±0,085	0,332±0,266	0,269±0,191	0,186±0,228	0,460±0,463
Nickel (Ni)	0,004±0,010	0,000±0,000	0,020±0,017	0,153±0,061	0,303±0,382	0,130±0,000	0,169±0,361	0,221±0,227	0,804±0,337	0,474±0,410
Zinc (Zn)	0,012±0,015	0,009±0,007	0,060±0,403	0,060±0,437	0,803±1,300	0,830±0,255	0,204±0,166	0,368±0,397	0,189±0,145	2,264±2,685
Arsenic (As)	0,060±0,119	0,046±0,056	0,233±0,165	0,140±0,178	0,080±0,085	0,000±0,000	0,220±0,278	0,242±0,278	0,978±0,836	5,103±5,857
Fer (Fe)	0,064±0,094	0,064±0,094	0,273±0,152	0,317±0,350	0,680±0,624	0,455±0,021	0,398±0,446	0,325±0,363	1,631±1,089	0,682±0,439
Manganèse (Mn)	0,011±0,012	0,010±0,012	0,307±0,156	0,770±0,858	0,137±0,055	0,135±0,134	0,509±0,319	0,732±0,686	0,245±0,324	0,589±0,397
Etain (Sn)	0,245±0,286	0,222±0,232	0,133±0,159	0,137±0,121	0,137±0,121	0,130±0,170	0,355±0,421	0,424±0,513	1,370±1,622	3,364±3,928
Polonium (Po)	0,143±0,214	0,039±0,050	0,650±0,131	0,380±0,114	0,381±0,115	0,420±0,127	0,150±0,215	0,192±0,214	0,238±0,336	0,848±1,042
Cobalt (Co)	0,010±0,016	0,020±0,017	0,303±0,525	0,460±0,584	0,313±0,169	0,130±0,014	0,503±1,075	0,232±323	0,711±0,385	0,270±0,339
Baryum (Ba)	3,260±3,412	3,272±3,422	16,667±0,503	2,113±0,804	4,633±4,120	1,050±0,919	2,305±2,354	2,491±2,979	1,233±0,845	1,905±1,403
Bore (B)	0,075±0,187	0,022±0,059	0,357±0,336	0,217±0,168	0,000±0,000	0,045±0,035	0,165±0,234	0,259±0,250	3,057±2,955	5,376±5,741
Silicium (Si)	0,194±0,247	0,064±0,068	0,033±0,577	0,490±0,465	0,053±0,042	0,530±0,339	0,165±0,207	0,288±0,338	13,231±14,617	37,027±44,13
Antimoine (Sb)	0,004±0,007	0,067±0,201	0,030±0,436	0,000±0,000	0,400±0,693	0,000±0,000	0,239±0,288	0,081±0,174	0,394±0,644	2,194±3,804
Sodium (Na)	2,997±2,248	2,270±1,270	1,433±0,351	3,467±2,732	18,27±16,30	9,450±2,900	2,045±1,148	5,787±4,723	6,933±6,291	12,81±9,418
Potassium (K)	3,752±4,131	2,660±2,014	1,233±0,945	1,467±0,551	13,03±11,46	7,100±0,990	2,830±1,961	4,215±3,250	10,350±6,588	15,63±8,388

SP = Saison pluvieuse ; SS = Saison sèche ; les codes PK 21, NDOG, SIC, ZIBA et ZIBO désignent les sites d'étude.

III.1.1.4. Physicochimie des sédiments

Les paramètres des sédiments évalués durant cette étude sont les Eléments Traces Métalliques (ETM) et les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP).

III.1.1.4.1. Eléments traces métalliques (ETM) et autres métaux

Les éléments traces métalliques et d'autres métaux mesurés dans les sédiments des différents sites d'étude ont varié d'un site à l'autre. Globalement, ces métaux ont présenté les plus fortes valeurs dans les zones industrielles (ZIBA et ZIBO) à l'exception du polonium et du cobalt qui ont été plus élevés plutôt dans le site de Ndogbong ; et les plus faibles teneurs ont été enregistrées dans la zone périurbaine de PK 21 (**Tableau XVI**).

Tableau XVI : Valeurs moyennes et écart-types des Eléments Traces Métalliques et d'autres métaux mesurés dans les sédiments des différents sites pendant la période d'étude

Sites Métaux (mg/kg)	PK 21	NDOG.	SIC	ZIBA	ZIBO
Plomb (Pb)	0,067±0,133	0,016±0,012	0,034±0,059	0,070±0,099	0,223±0,246
Cadmium (Cd)	0,381±0,366	0,118±0,117	0,190±0,190	0,361±0,302	0,879±0,851
Zinc (Zn)	0,105±0,178	0,242±0,295	0,422±0,724	0,389±0,360	0,607±0,550
Chrome (Cr)	0,019±0,032	0,139±0,169	0,015±0,007	0,403±0,312	0,230±0,312
Cuivre (Cu)	0,022±0,056	0,433±0,500	0,000±0,000	0,577±0,397	1,649±1,548
Nickel (Ni)	0,047±0,101	0,153±0,061	0,130±0,000	0,246±0,260	0,081±0,110
Fer (Fe)	0,089±0,116	0,133±0,035	0,455±0,021	0,688±0,761	0,997±2,326
Manganèse (Mn)	0,014±0,024	0,626±0,306	0,135±0,134	1,482±1,445	0,781±1,000
Etain (Sn)	0,202±0,236	0,095±0,094	0,126±0,112	0,379±0,361	0,862±0,857
Polonium (Po)	0,143±0,192	0,480±0,234	0,404±0,283	0,202±0,231	0,468±0,697
Cobalt (Co)	0,006±0,013	0,490±0,512	0,130±0,014	0,393±0,359	0,171±0,257

Les codes PK 21, NDOG, SIC, ZIBA et ZIBO désignent les sites d'étude.

III.1.1.4.2. Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)

Les valeurs moyennes des HAP (pyrène, naphthalène, fluorène, anthracène et phénanthrène) mesurés dans les sédiments des puits prospectés dans les différents sites durant la période de l'étude ont varié d'un site à l'autre. Le site périurbain de PK 21 a présenté des valeurs relativement faibles, tandis que les zones industrielles (ZIBA et ZIBO) ont présenté les

valeurs moyennes les plus élevées avec les plus fortes valeurs enregistrées à ZIBO (**Tableau XVII**). Le pyrène est totalement absent à PK 21 (0 µg/kg sec).

Tableau XVII : Valeurs moyennes et écart-types des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) mesurés dans les sédiments des différents sites pendant la période d'étude

Les codes PK 21, NDOG, SIC, ZIBA et ZIBO désignent les sites d'étude.

Sites HAP (µg/kg sec)	PK 21	NDOG.	SIC	ZIBA	ZIBO
Pyrène	0,000±0,000	1,667±1,528	11,667±2,082	42,000±24,205	162,20±85,890
Naphtalène	1,600±2,836	22,333±16,197	39,000±47,948	34,867±20,467	288,00±273,160
Fluorène	0,500±0,806	10,667±15,948	23,000±8,544	39,800±20,576	688,70±251,958
Anthracène	0,500±0,806	8,667±10,786	10,000±14,731	40,867±24,969	172,80±180,275
Phénanthrène	0,300±0,640	5,667±9,815	5,000±5,568	60,200±48,136	565,70±779,378

III.1.1.5. Typologie abiotique des sites d'étude

La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) réalisée à partir des données physicochimiques, géographique et hydromorphométriques a permis d'identifier trois (03) groupes (**Figure 22**). Le groupe III, représenté en gris, est constitué des sites de ZIBA, Ndogbong et de Cité SIC. Ces trois sites présentent des caractéristiques abiotiques similaires et significativement différentes de celles des autres sites. Néanmoins, aucune corrélation significative n'a été notée entre ces sites et les paramètres mesurés. Le groupe II (en jaune) est formé du site périurbain de PK 21. Ce site est significativement et positivement corrélé à la profondeur ($p < 0,05$). Enfin, le groupe I (en gris) est formé du site industriel de ZIBO. Ce dernier est significativement et positivement corrélé ($p < 0,05$) aux métaux lourds (Si, B, As, Sn et Cd) et à l'ion ammonium.

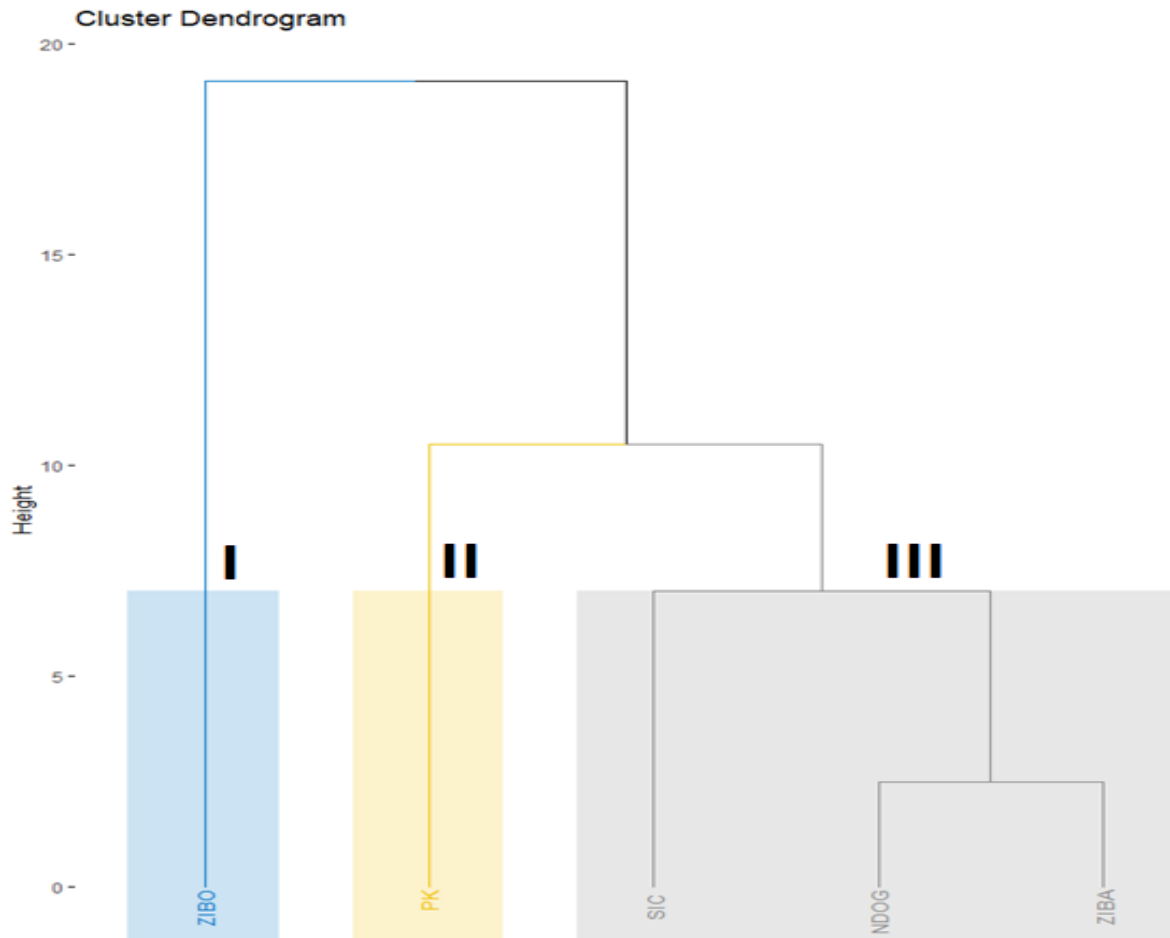


Figure 22 : Hiérarchisation des sites d'étude à partir de données abiotiques obtenues pendant la période d'étude ; NB : les chiffres romains I, II et III désignent les groupes constitués.

Une Analyse en Composantes Principales (ACP) a été réalisée à partir des valeurs moyennes des données abiotiques (**Figure 23**). Cette ACP a permis de relever les différentes corrélations existantes et de regrouper les sites d'étude en fonction de leurs affinités. Sur la figure 23A, seules les dimensions 1 (49,6%) et 2 (21,5%) ont été considérées, car elles cumulent 71,1% de l'inertie totale. La **figure 23B** illustre le cercle de corrélations qui existent entre les différents paramètres abiotiques. Trois (03) principaux groupes ont été formés (**Figure 23 C**).

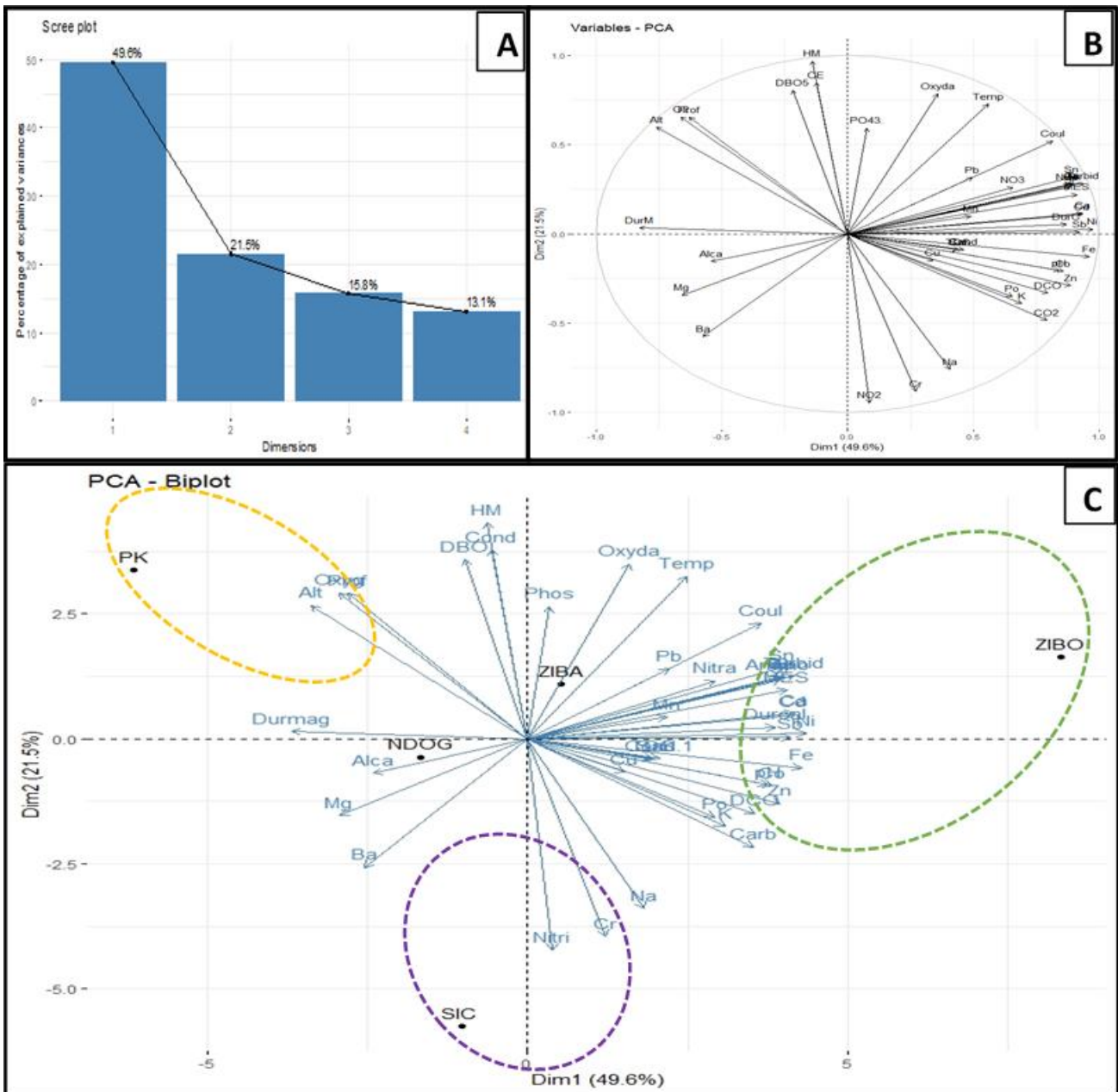


Figure 23 : Analyse en Composantes Principales (ACP) effectuée à partir des données abiotiques dans les différents sites d'étude : (A) Histogramme des valeurs propres, (B) cercle de corrélations ; (C) Biplot montrant les corrélations et la distribution des échantillons sur les dimensions Dim1 * Dim2. Acronymes : O₂ = Oxygène dissous ; Fe = Fer ; Al = Aluminium ; Si = Silice ; MES = Matières En Suspension ; Zn = zinc ; Ni = nickel ; Cr = chrome ; Mn = manganèse ; Turb = Turbidité ; DurC = Dureté Calcique ; DurM= Dureté Magnésienne ; Oxyda= Oxydabilité ; Alt= Altitude ; Prof= Profondeur ; HM= Hauteur de la margelle ; CE= Couche d'eau ; Cond.= Conductivité Electrique ; Cd = Cadmium ; Coul = Couleur ; Na = Sodium ; K=Potassium ; Cu = Cuivre ; PO₄³⁻ = Orthophosphate ; NH₄ = azote ammoniacal ; Temp= Température ; CO₂ = gaz carbonique ; NO₃⁻ = Nitrates ; Sal. = Salinité.

Le **groupe I** (marqué en jaune) montre que le site périurbain de PK 21, la saturation en oxygène, l'altitude sont, d'une part significativement et positivement ($p < 0,05$) corrélés entre eux et d'autre part, sont significativement et négativement corrélés à la dimension 1. De même, le site industriel de ZIBO, les MES, la Turbidité, l'Azote ammoniacal, la DCO et les métaux (Ca, Sb, Zn, Cd, Sn, Fe, Ni, B, Si, As) inclus dans le **groupe III** (marqué en vert) sont significativement et positivement ($p < 0,05$) corrélés entre eux et à la dimension 1, et négativement avec le groupe I. Le **groupe II** (marqué en violet) montre que le site de Cité SIC, les nitrites, le Chrome sont significativement et positivement corrélés ($p < 0,05$) entre eux et négativement à la hauteur de la margelle et à la dimension 2.

III.1.1.6. Résultats de la PERMANOVA réalisée sur les données abiotiques

L'analyse des variances sur les données abiotiques montre une variabilité significative entre les sites et entre les saisons ($p < 0,01$) et une interaction ($p < 0,05$) entre les sites et les saisons (**Tableau XVIII**). Ces différences entre les sites sont donc fortement dépendantes des saisons.

Sur le plan spatial, la chimie des eaux souterraines de la zone périurbaine de PK 21 est très significativement différente ($p < 0,01$) de celle des autres sites. Les eaux souterraines du site de Ndogbong présentent une chimie significativement différente de celle de Cité SIC ($p < 0,05$) et de celle de ZIBO ($p < 0,01$), mais pas différente de celle de ZIBA ($p > 0,05$). Le site de Cité SIC est significativement différent de ceux de ZIBA ($p < 0,05$) et de ZIBO ($p < 0,01$). Les sites industriels (ZIBA et ZIBO) sont également significativement différents ($p < 0,01$).

Sur le plan saisonnier, le site périurbain de PK 21 est très significativement différent ($p < 0,01$) des autres sites d'étude. La chimie de Ndogbong n'est pas différente ($p > 0,05$) de celle de Cité SIC, de ZIBA et de ZIBO quelle que soit la saison, sauf avec le site de ZIBO durant la saison de pluies ($p < 0,01$). Quant au site de Cité SIC, il est significativement différent ($p > 0,05$) de ZIBO en saison de pluies, mais pas en saison sèche. Il n'est pas différent ($p > 0,05$) de ZIBA quelle que soit la saison. Les sites des zones industrielles sont significativement différents ($p < 0,01$) durant les deux saisons.

Tableau XVIII : Résultats de l'analyse PERMANOVA des données abiotiques enregistrées dans les différents sites d'étude

Résultats de la PERMANOVA						Unique perms
Source	df	SS	MS	Pseudo-F	P (perm)	
Sites	4	893.11	223.28	6.9237	0.001**	999
Saisons	1	154.22	154.22	4.7824	0.001**	996
Site x Saison	4	194.01	48.503	1.504	0.012*	999
Res	67	2160.6	32.248			
Total	76	3496				

Effet sites		t	P (perm)	Unique perms
Toutes saisons				
PK 21, NDOG	2.9084	0.001**	998	
PK 21, SIC	3.067	0.001**	999	
PK 21, ZIBA	3.4234	0.001**	998	
PK 21, ZIBO	4.0207	0.001**	998	
NDOG, SIC	1.5268	0.031*	989	
NDOG, ZIBA	1.2663	0.084	999	
NDOG, ZIBO	1.7872	0.004**	997	
SIC, ZIBA	1.5777	0.023*	998	
SIC, ZIBO	1.5472	0.008**	998	
ZIBA, ZIBO	2.7876	0.001**	998	

Saison Pluie	t	P (perm)	perms
PK 21, NDOG	1.9366	0.004**	219
PK 21, SIC	2.31	0.004**	217
PK 21, ZIBA	2.3366	0.001**	995
PK 21, ZIBO	3.159	0.001**	993
NDOG, SIC	1.5298	0.099	10
NDOG, ZIBA	1.0968	0.277	508
NDOG, ZIBO	1.6788	0.003**	284
SIC, ZIBA	1.4244	0.091	515
SIC, ZIBO	1.5891	0.011*	280
ZIBA, ZIBO	2.0334	0.001**	999

Saison Sèche	t	P (perm)	perms
PK 21, NDOG	2.5935	0.003**	275
PK 21, SIC	2.5539	0.018*	66
PK 21, ZIBA	2.8266	0.001**	998
PK 21, ZIBO	2.9957	0.001**	994
NDOG, SIC	1.1225	0.202	10
NDOG, ZIBA	1.0225	0.351	519
NDOG, ZIBO	1.3121	0.064	220
SIC, ZIBA	1.3174	0.114	120
SIC, ZIBO	1.1405	0.201	55
ZIBA, ZIBO	2.34	0.001**	998

* = Corrélation significative à 0,05 ; ** =Corrélation significative à 0,01

III.1.1.7. Corrélations entre les caractéristiques des stations et la physicochimie de l'eau

Les caractéristiques des stations (profondeur, altitude, hauteur de la margelle et l'épaisseur de la couche d'eau) ont montré des corrélations très significatives avec certains variables abiotiques mesurés (**Tableau XIX**).

L'altitude a été négativement corrélée à la température de l'eau ($r = 0,155^*$). Le pH de l'eau quant à lui a été négativement corrélé à tous les paramètres des stations (profondeur, altitude, hauteur de la margelle et la couche d'eau) mesurés (Tableau XIII). La conductivité électrique, les TDS et la salinité de l'eau ont été négativement corrélés à la profondeur du puits ($r = -0,338^{**}$, $r = -0,320^{**}$, $r = -0,334^{**}$ respectivement), à l'altitude ($r = -0,427^{**}$, $r = -0,408^{**}$, $r = -0,420^{**}$ respectivement) et à la hauteur de la margelle ($r = -0,255^{**}$, $r = -0,260^{**}$, $r = -$

0,261** respectivement). La saturation en oxygène dissous a été significativement corrélée à la profondeur du puits ($r= 0,509^{**}$), à l'altitude ($r= 0,508^{**}$), à la hauteur de la margelle ($r= 0,292^{**}$) et à l'épaisseur de la couche d'eau ($r= 0,196^*$). Les métaux mesurés ont été tous significativement et négativement corrélés à la profondeur du puits et à l'altitude. D'autres encore ont été négativement corrélés à la hauteur de la margelle et l'épaisseur de la couche d'eau (**Tableau XIX**).

Tableau XIX : Variations du coefficient de corrélation r de Spearman entre les caractéristiques des stations et la physicochimie de l'eau

	Profondeur	Altitude	Hauteur Margelle	Couche d'eau
Température	- 0,060	-0,155*	- 0,052	- 0,147
pH	- 0,574**	-0,469**	-0,387**	-0,208**
Conductivité électrique	-0,338**	-0,427**	-0,255**	0,014
TDS	-0,320**	-0,408**	-0,260**	0,024
Salinité	-0,334**	-0,420**	-0,261**	0,020
O₂	0,509**	0,508**	0,292**	0,196*
CO₂	-0,303**	-0,375**	- 0,151	0,005
Alcalinité	-0,055	-0,114	-0,044	0,273**
Couleur	-0,060	-0,171*	-0,006	-0,051
MES	-0,172*	-0,212**	-0,134	0,023
Turbidité	-0,177*	-0,271**	-0,068	-0,077
NO₂⁻	-0,364**	-0,410**	-0,242**	0,121
NH₄⁺	-0,139	-0,207**	-0,083	0,015
DCO	-0,290**	-0,391**	0,112	0,222**
Dureté calcique	-0,183*	-0,216**	-0,130	-0,104
K	-0,297**	-0,445**	0,012	-0,057
Na	-0,288**	-0,353**	-0,052	-0,033
Mg	0,242**	0,322**	0,133	0,036
Ca	-0,269**	-0,327**	0,040	-0,065
Ba	-0,041	0,201**	0,073	0-,251**
Zn	-0,554**	-0,495**	-0,248**	-0,133
Cd	-0,356**	-0,455**	-0,142	-0,035
Sn	-0,193*	-0,245**	0,016	0,083
Pb	-0,241**	-0,438**	0,056	-0,165*
Po	-0,321**	-0,307**	-0,213**	0,017
Cu	-0,476**	-0,413**	-0,291**	-0,028
Cr	-0,426**	-0,572**	-0,291**	0,045
Mn	-0,550**	-0,511**	-0,155*	-0,179*
Fe	-0,632**	-0,651**	-0,137	-0,212**
Co	-0,530**	-0,554**	-0,250**	-0,088
Ni	-0,517**	-0,662**	-0,115	-0,047
B	-0,338**	-0,416**	-0,074	0,080
Si	-0,253**	-0,481**	0,027	0,115
As	-0,509**	-0,531**	0,008	-0,100
Sb	-0,267**	-0,461**	-0,135	0,143

** . Corrélation significative au seuil 0.01; * . Corrélation significative au seuil 0.05.

III.1.2. Faune aquatique souterraine de la ville de Douala

III.1.2.1. Variations intrasites des abondances et richesses taxonomiques

III.1.2.1.1. Faune du site périurbain de PK 21

Le site périurbain de PK 21 présente une faune relativement faible avec seulement 196 organismes récoltés appartenant à 15 familles différentes (**Tableau XX**). Un seul taxon stygobie (Stenasellidae) a été enregistré dans huit (08) des dix puits prospectés. Les familles de Cyclopidae (20,41%), Stenasellidae (17,86%), Formicidae (13,27%), Lumbriculidae (12,76%) sont les mieux représentées. Sur le plan spatial, les puits PKP9 et PKP10 sont les plus riches et diversifiés avec une répartition relativement équitable des taxa présents ; tandis que les autres puits sont les moins riches et moins diversifiés (**Tableau XX**). L'équitabilité de Pielou montre que très peu de taxa dominant le peuplement dans ces derniers puits. Cependant, aucune différence significative n'a été notée sur le plan spatial et saisonnier entre les abondances des taxons ($p = 0,139$, $p = 0,698$ respectivement) et entre les richesses taxonomiques ($p = 0,239$, $p = 0,698$ respectivement).

Tableau XX : Liste des familles d'invertébrés récoltés dans le site périurbain de PK 21. Les nombres indiquent les abondances des taxons.

Familles	PKP1	PKP2	PKP3	PKP4	PKP5	PKP6	PKP7	PKP8	PKP9	PKP10	Total
Lumbricidae	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	4
Lumbriculidae	2	2	0	0	1	0	0	0	10	10	25
Naididae	0	0	0	0	1	0	0	0	13	0	14
Tubificidae	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	4
Cyclopidae	2	0	0	0	0	0	1	0	32	5	40
Stenasellidae*	12	6	4	5	2	0	1	0	1	4	35
Cyprididae	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
Hydracaridae	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Ceratopogonidae	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2
Chironomidae	0	0	2	0	7	1	1	7	0	0	18
Culicidae	0	0	15	0	0	2	0	2	0	0	19
Isotomidae	0	0	0	1	0	0	0	0	3	0	4
Libellulidae	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Formicidae	14	3	1	1	0	0	0	1	1	5	26
Lymnaeidae	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Total	31	12	24	7	11	4	3	10	68	26	196
S	5	4	5	3	4	3	3	3	9	6	15
H'	1,72	1,73	1,64	1,15	1,49	1,50	1,58	1,16	2,28	2,22	
J	0,44	0,44	0,42	0,29	0,38	0,38	0,41	0,30	0,58	0,57	

(*)= Taxon stygobie, S= Richesse taxonomique, H'= Indice de diversité de Shanonn et Weaver, J= Equitabilité de Pielou

III.1.2.1.2. Faune des sites urbains de Ndogbong et Cité SIC

Le site de Ndogbong enregistre 615 organismes appartenant à treize (13) familles différentes (**Tableau XXI**). La famille des Cyprididae (82,44%) domine largement la faune. Le puits NDOGP2 est plus riche et présente la plus forte abondance tandis que NDOGP1 est la station la plus faiblement diversifiée. Dans ces deux puits, il existe une domination de la famille de Cyprididae sur les autres taxa. Par contre, le puits NDOGP3 est le plus diversifié et les taxa enregistrés y sont presque équitablement répartis (**Tableau XXI**). Cependant, aucune différence significative n'a été notée sur le plan spatial et saisonnier entre les abondances des taxons ($p = 0,455$, $p = 0,699$ respectivement) et entre les richesses taxonomiques ($p = 0,100$, $p = 0,310$ respectivement) au test de Kruskal-Wallis.

Tableau XXI : Liste des familles d'invertébrés récoltés dans les sites de Ndogbong et Cité SIC. Les nombres indiquent les abondances des taxons.

Familles	NDOGBONG				CITE SIC			
	NDOGP1	NDOGP2	NDOGP3	Total	SICP1	SICP2	SICP3	Total
Glossiphoniidae	0	2	0	2	0	0	0	0
Lumbricidae	0	2	2	4	3	0	0	3
Lumbriculidae	2	5	37	44	15	1	0	16
Naïdidae	0	0	0	0	8	2	0	10
Oniscidae	0	0	2	2	0	0	0	0
Cyprididae	196	270	41	507	0	6	13	19
Hydracaridae	0	0	0	0	0	1	0	1
Dryopidae	0	0	0	0	1	0	0	1
Dytiscidae	0	1	0	1	0	0	0	0
Elmidae	0	1	0	1	0	0	0	0
Ceratopogonidae	1	0	5	6	4	0	0	4
Chironomidae	6	24	8	38	18	3	3	24
Culicidae	0	0	0	0	2	0	0	2
Psychodidae	0	1	2	3	25	0	0	25
Ptychopteridae	0	0	0	0	1	0	0	1
Stratiomyidae	0	0	0	0	23	0	0	23
Isotomidae	0	0	0	0	0	1	0	1
Gomphidae	0	0	0	0	0	1	0	1
Libellulidae	0	2	0	2	0	1	0	1
Formicidae	0	2	1	3	4	2	0	6
Lymnaeidae	0	0	2	2	0	0	0	0
Total	205	310	100	615	104	18	16	138
S	4	10	9		11	9	2	
H'	0,31	0,82	2,08		2,85	2,82	0,70	
J	0,08	0,22	0,56		0,71	0,71	0,17	

S= Richesse taxonomique, H'= Indice de diversité de Shanonn et Weaver, J= Equitabilité de Pielou

Le site de Cité SIC présente également une faune relativement faible avec un total de 138 organismes recensés appartenant à 16 familles (**Tableau XXI**). Les familles de Psychodidae (18,12 %), Chironomidae (17,39 %), Stratiomyidae (16,67 %) et Cyprididae (13,77 %) sont les mieux représentées. Le puits SICP1 présente la plus forte abondance (sensiblement 75% de la faune de ce site). Les puits SICP1 et SICP2 sont plus riches et plus diversifiés, et les organismes y sont presque équitablement répartis au sein des familles ; tandis que la station SICP3 est très faiblement diversifiée avec une domination de la famille de Cyprididae (**Tableau XXI**). Aucune différence significative n'a été notée sur le plan spatial et saisonnier entre les abondances des taxons ($p = 0,307$, $p = 0,310$ respectivement) et entre les richesses taxonomiques ($p = 0,133$, $p = 0,485$ respectivement) dans les différentes stations au test de Kruskal-Wallis.

III.1.2.1.3. Faune du site industriel de ZIBA

Dans la zone industrielle de Bassa (ZIBA), 2368 organismes ont été collectés appartenant à 17 familles différentes d'invertébrés (**Tableau XXII**). Les familles de Cyprididae (28,76 %), Lumbriculidae (21,75 %), Chironomidae (21,11 %) et Cyclopidae (12,12 %) sont les plus représentées. Sur le plan spatial, ZIBAP2 (23,35 %), ZIBAP13 (15,41 %), ZIBAP14 (12,96 %), ZIBAP1 (12,58 %) et ZIBAP3 (9,84 %) sont les puits présentant les plus fortes abondances. La plus grande richesse taxonomique (10) a été enregistrée à ZIBAP2. Les puits ZIBAP4, ZIBAP6, ZIBAP7, ZIBAP10 et ZIBAP12 sont les plus diversifiés. Dans ces dernières stations, la faune y est moyennement équirépartie (**Tableau XXII**). Les abondances des taxons enregistrés ont significativement varié sur le plan spatial ($p = 0,023$) et ont été presque similaires ($p = 0,801$) sur le plan saisonnier alors qu'aucune différence significative n'a été notée sur le plan spatial et saisonnier entre les richesses taxonomiques ($p = 0,576$, $p = 0,387$ respectivement) dans les différentes stations au test de Kruskal-Wallis.

III.1.2.1.4. Faune du site industriel de ZIBO

Dans la zone industrielle de Bonabéri (ZIBO), 1442 organismes ont été collectés appartenant à 25 familles d'invertébrés différentes (**Tableau XXIII**). Les familles de Chironomidae (24,83 %), Cyprididae (17,61 %), Physidae (16,09 %), Cyclopidae (14,98 %) et Lumbriculidae (10,26 %) sont les plus représentées. Sur le plan spatial, ZIBOP7 (25,38 %), ZIBOP5 (18,79 %), ZIBOP3 (15,53 %) et ZIBOP8 (13,80 %) sont les puits ayant les fortes abondances. La plus grande richesse taxonomique (20) a été enregistrée à ZIBOP9. Les puits ZIBOP2, ZIBOP4 et ZIBOP9 sont les plus diversifiés. Dans ce dernier puits, les organismes

récoltés sont presque équitablement répartis au sein des taxa enregistrés (**Tableau XXIII**). Les abondances des taxons enregistrés ont significativement varié sur le plan spatial ($p = 0,041$) et ont été presque similaires ($p = 0,583$) sur le plan saisonnier alors qu'aucune différence significative n'a été notée sur le plan spatial et saisonnier entre les richesses taxonomiques ($p = 0,239$, $p = 0,495$) dans les différentes stations au test de Kruskal-Wallis.

III.1.2.2. Variations intersites des abondances et richesses taxonomiques

Au total dans les cinq sites prospectés, 4759 organismes ont été récoltés, appartenant à quatre (04) embranchements (Annélides, Arthropodes, Mollusques et Nématelminthes), six (06) classes (Achéates, Oligochètes, Crustacés, Insectes, Gastéropodes et Gordiacés), quatorze (14) ordres et trente (30) familles.

Les abondances et les richesses taxonomiques de la faune aquatique souterraine de Douala ont varié de 138 à 2368 organismes et de 13 à 25 familles respectivement (**Figure 24**). Le site de ZIBA a enregistré la plus grande abondance (2368 organismes récoltés), suivi du site de ZIBO (1442 organismes récoltés). Les sites de Cité SIC et de PK 21 ont présenté les plus faibles abondances avec respectivement 138 et 196 organismes récoltés (**Figure 24A**). Durant toute la période de l'étude, tous les sites ont présenté les plus grandes abondances pendant la saison des pluies, excepté le site de PK 21 où les plus grandes abondances étaient enregistrées pendant la saison sèche (**Figure 24B**). Les abondances des taxons enregistrés ont très significativement varié entre les différents sites d'étude au test de Kruskal-Wallis ($p = 2,040 \times 10^{-5}$). Les sites de PK 21 et Cité SIC ont présenté des abondances presque similaires ($p = 0,579$) et significativement différentes ($p < 0,01$ et $p < 0,05$ respectivement) de celles enregistrées à NDOG, ZIBA et ZIBO. Aucune différence significative ($p > 0,05$) n'a été enregistrée entre les abondances obtenues dans ces trois derniers sites.

Le site de ZIBO a hébergé la plus grande richesse taxonomique (25) tandis que les autres sites ont presque la même richesse avec la plus faible enregistrée dans le site de Ndogbong (**Figure 24C**). Cette richesse taxonomique est plus importante durant la saison des pluies dans tous les sites, sauf dans le site de ZIBO où les plus grandes richesses taxonomiques ont été enregistrées durant la saison sèche. (**Figure 24D**). Des différences très significatives ont été notées entre les richesses taxonomiques obtenues dans les différents sites d'étude ($p = 0,004$). Le site périurbain de PK 21 a présenté une richesse très significativement différente ($p < 0,01$) de celles obtenues dans les sites industriels (ZIBA et ZIBO) et également différente de celle obtenue à NDOG ($p < 0,05$). Aucune différence significative n'a été obtenue entre les autres sites.

Tableau XXII : Liste des familles d'invertébrés récoltés dans le site industriel de ZIBA. Les nombres indiquent les abondances des taxons.

Familles	ZIBAP1	ZIBAP2	ZIBAP3	ZIBAP4	ZIBAP5	ZIBAP6	ZIBAP7	ZIBAP8	ZIBAP9	ZIBAP10	ZIBAP11	ZIBAP12	ZIBAP13	ZIBAP14	ZIBAP15	Total
Lumbriculidae	0	1	0	2	8	3	2	53	26	2	10	55	280	14	59	515
Naïdidae	1	0	0	0	7	0	1	19	16	14	2	13	75	0	18	166
Tubificidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	12
Cyclopidae	55	158	4	2	0	0	0	0	0	0	12	39	5	6	6	287
Cyprididae	183	127	12	2	0	0	1	0	0	19	64	0	3	256	14	681
Cytheridae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6	0	0	0	7
Hydracarinae	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	5
Ceratopogonidae	0	1	9	8	0	6	5	8	5	4	2	2	0	1	0	51
Chironomidae	18	233	203	4	8	1	13	1	0	1	0	6	0	9	3	500
Culicidae	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	4	0	18
Psychodidae	1	2	0	0	0	3	1	5	0	1	3	0	1	2	0	19
Isotomidae	3	1	0	0	0	3	4	1	0	2	0	0	0	0	0	14
Cordulidae	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Formicidae	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2
Lymnaeidae	20	4	2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	14	0	42
Physidae	16	22	3	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	44
Gordiidae	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3
Total	298	553	233	20	24	17	29	88	47	46	95	143	365	307	103	2368
S	9	10	6	7	4	6	9	7	3	9	8	8	6	9	6	
H'	1,76	1,90	0,82	2,42	1,77	2,34	2,45	1,69	1,35	2,31	1,63	2,39	0,95	1,07	1,83	
J	0,43	0,46	0,20	0,59	0,43	0,57	0,60	0,41	0,33	0,56	0,40	0,59	0,23	0,26	0,45	

S= Richesse taxonomique, H'= Indice de diversité de Shanonn et Weaver, J= Equitabilité de Pielou

Tableau XXIII : Liste des familles d'invertébrés récoltés dans le site de ZIBO. Les nombres indiquent les abondances des taxons.

Familles	ZIBOP1	ZIBOP2	ZIBOP3	ZIBOP4	ZIBOP5	ZIBOP6	ZIBOP7	ZIBOP8	ZIBOP9	ZIBOP10	Total
Glossiphoniidae	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2
Lumbriculidae	4	10	100	9	8	2	10	0	3	2	148
Naïdidae	0	8	17	5	1	0	3	1	0	1	36
Cyclopidae	0	20	32	3	6	0	140	13	2	0	216
Cyprididae	0	7	7	0	0	0	109	131	0	0	254
Hydracarinae	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	3
Dryopidae	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2
Dytiscidae	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2
Elmidae	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2
Hydrophilidae	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	3
Hygrobiidae	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2
Ceratopogonidae	0	2	0	0	1	0	0	0	3	0	6
Chironomidae	7	0	4	3	253	3	42	29	17	0	358
Culicidae	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	4
Psychodidae	2	1	1	0	2	0	0	1	2	0	9
Ptychopteridae	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2
Stratiomyidae	2	0	0	1	0	0	0	0	2	0	5
Isotomidae	2	18	1	0	0	0	0	0	2	0	23
Cordulidae	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2
Gomphidae	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2
Libellulidae	0	0	0	0	0	0	10	0	2	0	12
Formicidae	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	3
Lymnaeidae	0	0	0	0	0	22	18	9	3	2	54
Physidae	0	0	0	0	0	183	34	15	0	0	232
Gordiidae	0	0	57	3	0	0	0	0	0	0	60
Total	17	66	221	24	271	215	366	199	58	5	1442
S	5	7	10	6	6	7	8	7	20	3	
H'	2,11	2,40	2,11	2,32	0,48	0,84	2,28	1,62	3,86	1,52	
J	0,45	0,52	0,46	0,50	0,10	0,18	0,49	0,35	0,83	0,33	

S= Richesse taxonomique, H'= Indice de diversité de Shanonn et Weaver, J= Equitabilité de Pielou

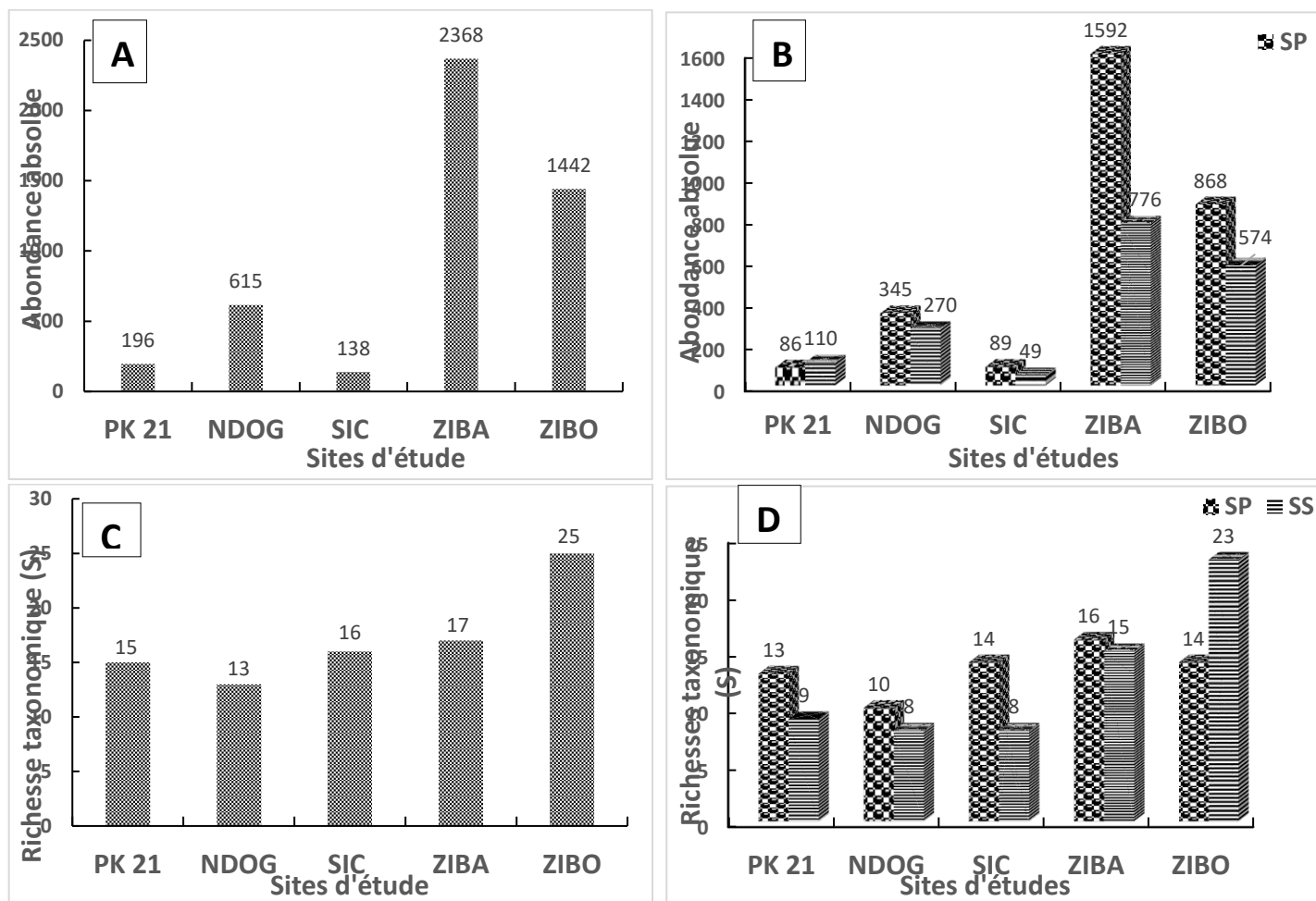


Figure 24 : Variations spatiales et saisonnières des abondances (A, B) et des richesses taxonomiques (C, D) dans les différents sites d'étude durant la période de l'étude. SP= Saison de pluies, SS= Saison sèche.

Des quatre (04) embranchements répertoriés, celui des Arthropodes est le plus représenté (**Figure 25**). Dans la zone périurbaine de PK 21 (**Figure 25A**), la faune récoltée est dominée par les Arthropodes (75,51%), suivi des Annélides (23,98%) ; et les Mollusques y sont faiblement représentés (0,51%).

Le site de Ndogbong contient une faune fortement dominée par les Arthropodes (91,5%) ; les Annélides et les Mollusques représentant moins de 10% de cette faune (**Figure 25B**).

Le site de Cité SIC (**Figure 25C**) n'est constitué que des Arthropodes (79%) et des Annélides (21%).

La faune de ZIBA et de ZIBO est composée de quatre (04) embranchements et dominée par les Arthropodes (**Figures 25 D et E**). Cependant, cet embranchement y est moins représenté (66,98% et 63,11% respectivement) comparativement aux autres sites. Seules ces zones

industrielles hébergent les Némathelminthes avec une plus grande proportion enregistrée à ZIBO (4,16% de la faune de ce site). Les eaux souterraines de ce dernier site hébergent plus de Mollusques (19,83%) par rapport aux autres.

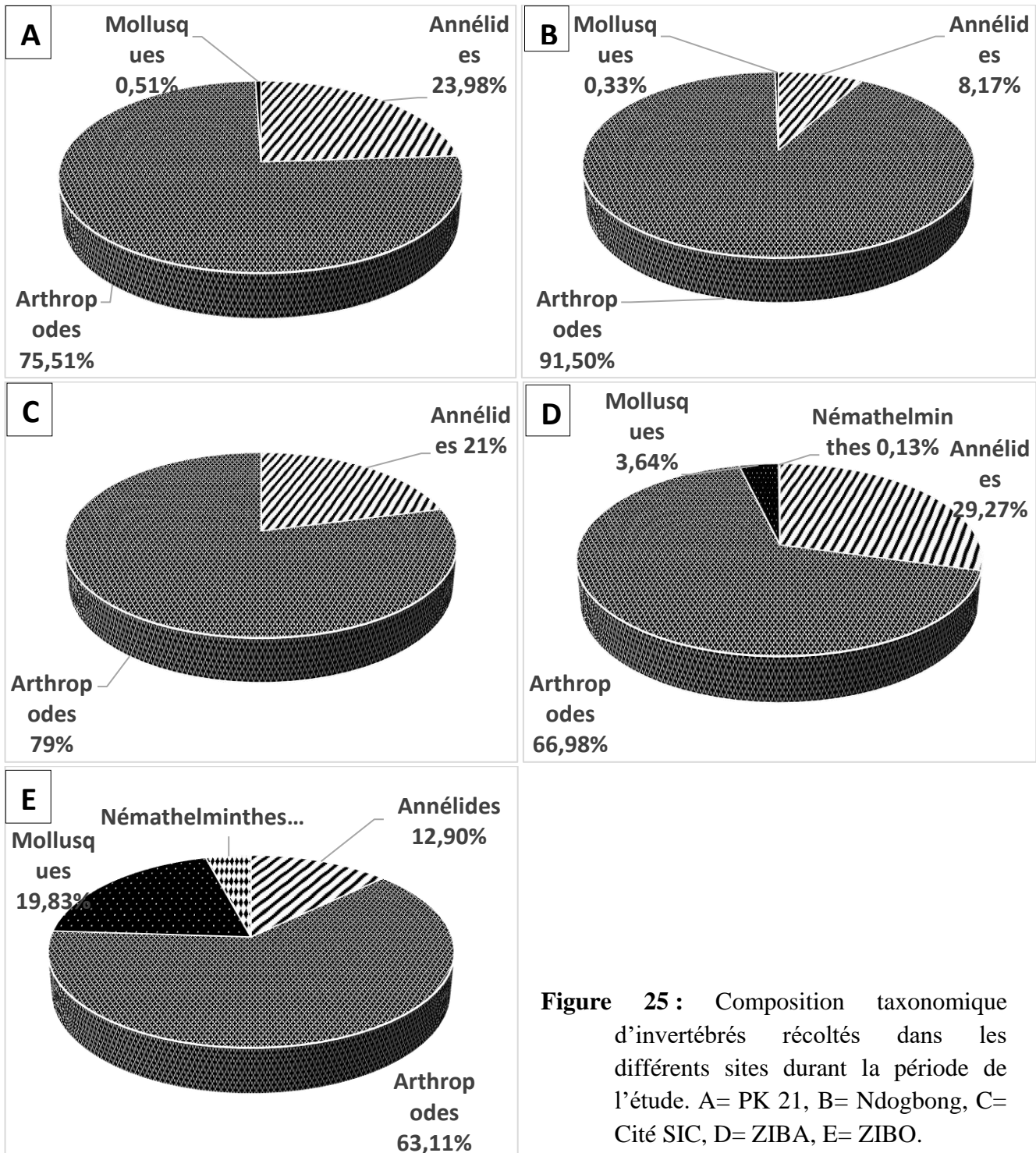


Figure 25 : Composition taxonomique d'invertébrés récoltés dans les différents sites durant la période de l'étude. A= PK 21, B= Ndogbong, C= Cité SIC, D= ZIBA, E= ZIBO.

Les eaux souterraines de PK 21 hébergent quatre (04) classes différentes d'invertébrés (Crustacés, Insectes, Gastéropodes et Oligochètes). Cette faune est dominée par les Crustacés

(39,29%), les Insectes (36,22%) et les Oligochètes (23,98%). Les Gastéropodes y sont faiblement représentés avec moins de 1% de la faune totale (**Figure 26A**). La classe des Crustacés héberge la famille stygobie des Stenasellidae du genre *Metastenasellus*. Ce taxon stygobie n'est présent que dans la zone périurbaine de PK 21 et a fait l'objet d'une étude minutieuse dans le cadre de ce travail.

Le site de Ndogbong contient une faune constituée de cinq (05) classes d'invertébrés (Achètes, Crustacés, Gastéropodes, Insectes et Oligochètes). Cette faune est très largement dominée par les Crustacés qui représentent plus de 80% de l'ensemble de la faune récoltée (**Figure 26B**).

Les eaux souterraines de Cité SIC hébergent seulement trois (03) classes différentes d'invertébrés (Crustacés, Insectes et Oligochètes). La faune de cette localité est principalement dominée par les Insectes représentant plus de 65% de la faune aquatique souterraine (**Figure 26C**).

Dans le site de la zone industrielle de Douala Bassa (ZIBA), la faune aquatique souterraine est composée de cinq (05) classes d'invertébrés (Crustacés, Gastéropodes, Gordiacés, Insectes et Oligochètes). Les Crustacés, les Oligochètes et les Insectes dominent cette faune avec respectivement 41,17%, 29,27% et 25,8% de l'ensemble des organismes récoltés (**Figure 26D**). Les Gastéropodes et les Gordiacés représentent moins de 4% de la faune totale de ce site.

Dans le site la zone industrielle de Douala Bonabéri (ZIBO), la faune aquatique souterraine est constituée de six (06) classes différentes d'invertébrés (Achètes, Crustacés, Gastéropodes, Gordiacés, Insectes et Oligochètes). Les Crustacés, les Insectes et les Gastéropodes sont les plus représentés avec respectivement 32,6%, 30,51% et 19,83% de l'ensemble de la faune récoltée (**Figure 26E**).

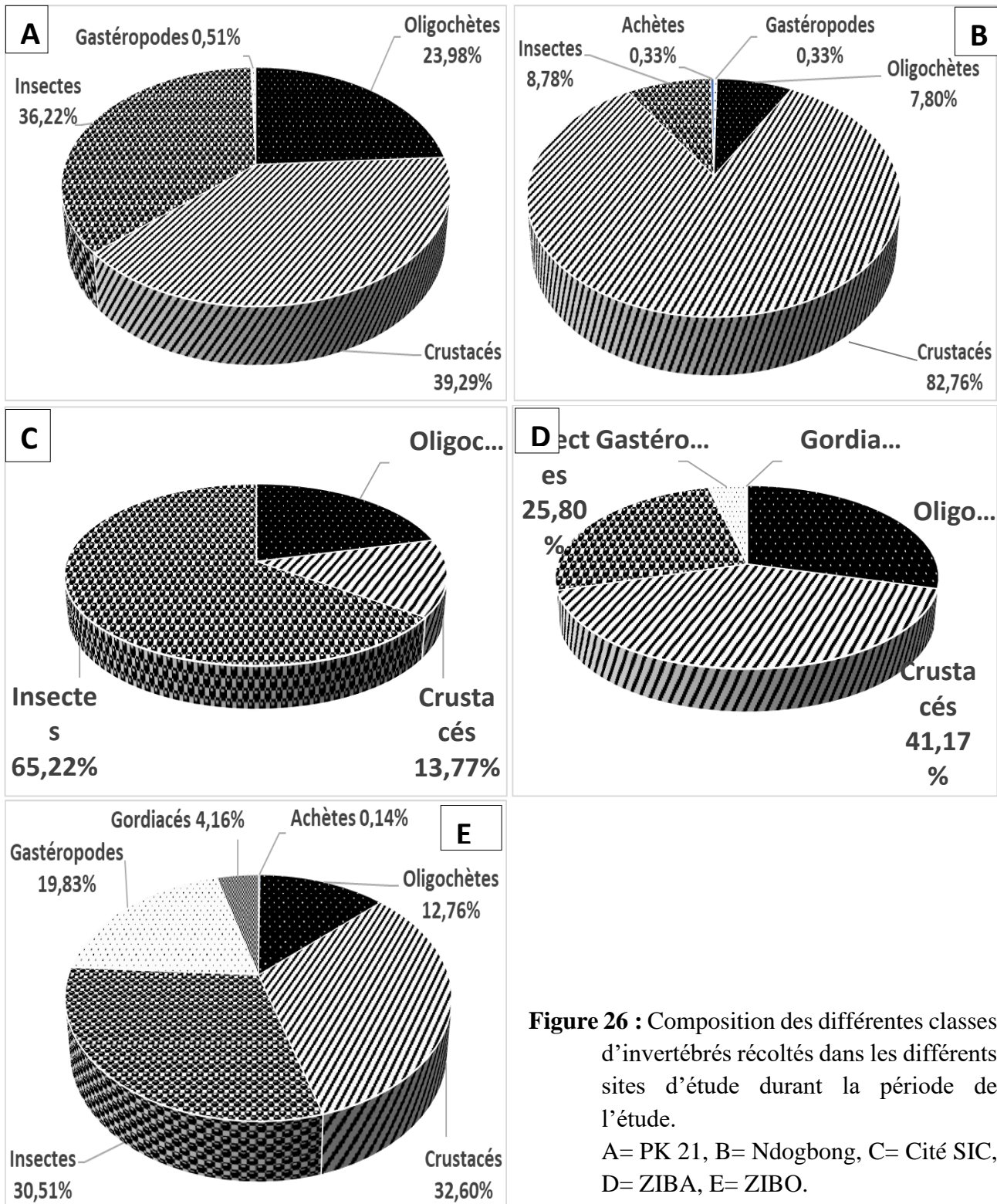


Figure 26 : Composition des différentes classes d'invertébrés récoltés dans les différents sites d'étude durant la période de l'étude.
 A= PK 21, B= Ndogbong, C= Cité SIC, D= ZIBA, E= ZIBO.

L'embranchement des Annélides a été représenté par les classes d'Achètes et d'Oligochètes. Seule une famille d'Achètes a été obtenue, celle de Glossiphoniidae dans les sites de Ndogbong et de ZIBO à égale abondance (2). Au total quatre (04) familles d'Oligochètes ont été recensées (Lumbricidae, Lumbriculidae, Naïdidae et Tubificidae). La famille de Lumbriculidae a été la plus dominante dans tous les sites (**Tableau XXIV**).

L'embranchement des Arthropodes a été le plus abondant regroupant deux (02) classes (Crustacés et Insectes) et 22 familles d'invertébrés différentes. La classe des Crustacés a présenté cinq (05) familles (Cyclopidae, Oniscidae, Stenasellidae, Cyprididae et Cytheridae). Les Cyclopidae ont été absents dans les sites de Ndogbong et de Cité SIC et plus présents dans les sites industriels (ZIBA et ZIBO). La famille d'Oniscidae n'a été présente que dans le site de Ndogbong. La famille stygobie quant à elle n'a été récoltée que dans le site témoin de PK 21. Parmi les Ostracodes recensés, la famille de Cyprididae a été largement dominante dans tous les sites par rapport à celle de Cytheridae qui n'a été présente qu'à ZIBA (**Tableau XXIV**). La classe des Insectes a présenté 17 familles d'invertébrés et la famille de Chironomidae a été la plus abondante avec une présence accrue dans les sites industriels (ZIBA et ZIBO).

Pour ce qui est de l'embranchement des Mollusques, seulement deux (02) familles différentes ont été recensées (Lymnaeidae et Physidae). Ces familles ont été plus abondantes dans les sites industriels (ZIBA et ZIBO) avec une nette domination des Physidae (**Tableau XXIV**).

L'embranchement des Némathelminthes a été représenté par la seule famille de Gordiacaee enregistrée uniquement dans les sites industriels (ZIBA et ZIBO) et est plus abondante dans le site de ZIBO (**Tableau XXIV**).

Tableau XXIV : Liste des taxa d'invertébrés récoltés dans les différents sites durant la période d'étude. Les nombres indiquent les abondances des différents taxa.

Embranchements	Classes	Ordre	Famille	Genre/Espèce	PK 21	NDOG.	SIC.	ZIBA	ZIBO	Total	
Annélides	Achètes	Rhynchobdellida	Glossiphoniidae	<i>Batracobdella sp.</i>	0	2	0	0	2	4	
	Oligochètes	Lumbriculida	Lumbriculidae		25	44	16	515	148	748	
		Haplotaxida	Lumbricidae		4	4	3	0	0	11	
			Naididae		14	0	10	166	36	226	
			Tubificidae		4	0	0	12	0	16	
Arthropodes	Crustacés	Cyclopoides	Cyclopidae		40	0	0	287	216	543	
		Isopodes	Oniscidae		0	2	0	0	0	2	
			Stenasellidae*	<i>Metastenasellus boutini*</i>	35	0	0	0	0	35	
		Ostracodes	Cyprididae		2	507	19	681	254	1463	
			Cytheridae		0	0	0	7	0	7	
	Insectes	Acariens	Hydracarinae		1	0	1	5	3	10	
		Coléoptères	Dryopidae		0	0	1	0	2	3	
			Dytiscidae		0	1	0	0	2	3	
			Elmidae		0	1	0	0	2	3	
			Hydrophilidae		0	0	0	0	3	3	
			Hygrobiidae		0	0	0	0	2	2	
		Diptères	Ceratopogonidae		2	6	4	51	6	69	
			Chironomidae	<i>Chironomus sp.</i>	18	38	24	500	358	938	
			Culicidae		19	0	2	18	4	43	
			Psychodidae		0	3	25	19	9	56	
			Ptychopteridae		0	0	1	0	2	3	
			Stratiomyidae	<i>Stratiomys sp.</i>	0	0	23	0	5	28	
		Entomobryomorpes	Isotomidae		4	0	1	14	23	42	
		Odonates	Cordulidae		0	0	0	1	2	3	
			Gomphidae		0	0	1	0	2	3	
	Libellulidae		<i>Libellula sp.</i>	1	0	1	0	10	12		
			<i>Orthotrum sp.</i>	0	2	0	1	2	5		
	Hyménoptères	Formicidae		26	3	6	2	3	40		
	Mollusques	Gastéropodes	Basommatophores	Lymnaeidae	<i>Galba truncatula</i>	1	0	0	27	15	43
					<i>Radix sp.</i>	0	0	0	7	35	42
				<i>Stagnicola sp.</i>	0	2	0	8	4	14	
			Physidae	<i>Aplexa hypnorum</i>	0	0	0	4	0	4	
				<i>Physa sp.</i>	0	0	0	40	232	272	
	Némathelminthes	Gordiacés	Gordiida	Gordiidae		0	0	0	3	60	63
	Total					196	615	138	2368	1442	4759
S					15	13	16	17	25	30	

*= taxon stygobie, S=Richesse taxonomique (Famille)

III.1.2.3. Classification écologique de la faune aquatique souterraine de Douala

La faune aquatique souterraine de la ville de Douala est constituée de trois (03) groupes écologiques (Stygoxènes, Stygophiles et Strygobies), mais à des proportions différentes (**Figure 27**). Les stygophiles constituent le groupe écologique le plus dominant dans tous les sites prospectés. De façon globale (**Figure 27A**), sur les 4759 organismes recensés, les stygoxènes constituent 0,88% de la faune et représentés par les familles d'Oniscidae et de Formicidae. La famille de Stenasellidae est le seul représentant des stygobies qui constituent 0,74% de cette faune. Les stygophiles quant à eux constituent 98,38% de la stygofaune et sont constitués de 27 autres familles d'invertébrés récoltés (**Tableau XXIV**).

Dans le site périurbain de PK 21 (**Figure 27B**), les stygoxènes, représentés par la famille de Formicidae, constituent 13,27% de la stygofaune. La famille stygobie des Stenasellidae constitue 17,86% et les stygophiles représentent quant à eux 68,88% de cette faune. Ce dernier groupe est constitué de 13 autres familles récoltées dans ce site (**Tableau XX**).

La faune des sites urbains de Ndogbong (NDOG) et Cité SIC (SIC) est constituée uniquement des stygoxènes (0,81% et 4,35% respectivement) et stygophiles (99,19% et 95,65% respectivement). Dans le site de Ndogbong (**Figure 27C**), les stygoxènes sont constitués des familles de Formicidae et d'Oniscidae ; les 11 autres familles recensées (**Tableau XXI**) constituent le groupe de stygophiles. Dans le site de Cité SIC (**Figure 27D**), la famille de Formicidae est le seul représentant stygoxène et les 15 autres familles récoltées (**Tableau XXI**) sont stygophiles.

Dans les sites industriels de ZIBA (**Figure 27E**) et de ZIBO (**Figure 27F**), la faune est également constituée uniquement des stygoxènes (0,08% et 0,21% respectivement) et stygophiles (99,92% et 99,79% respectivement). Les Formicidae constituent la seule famille stygoxène recensée dans ces sites.

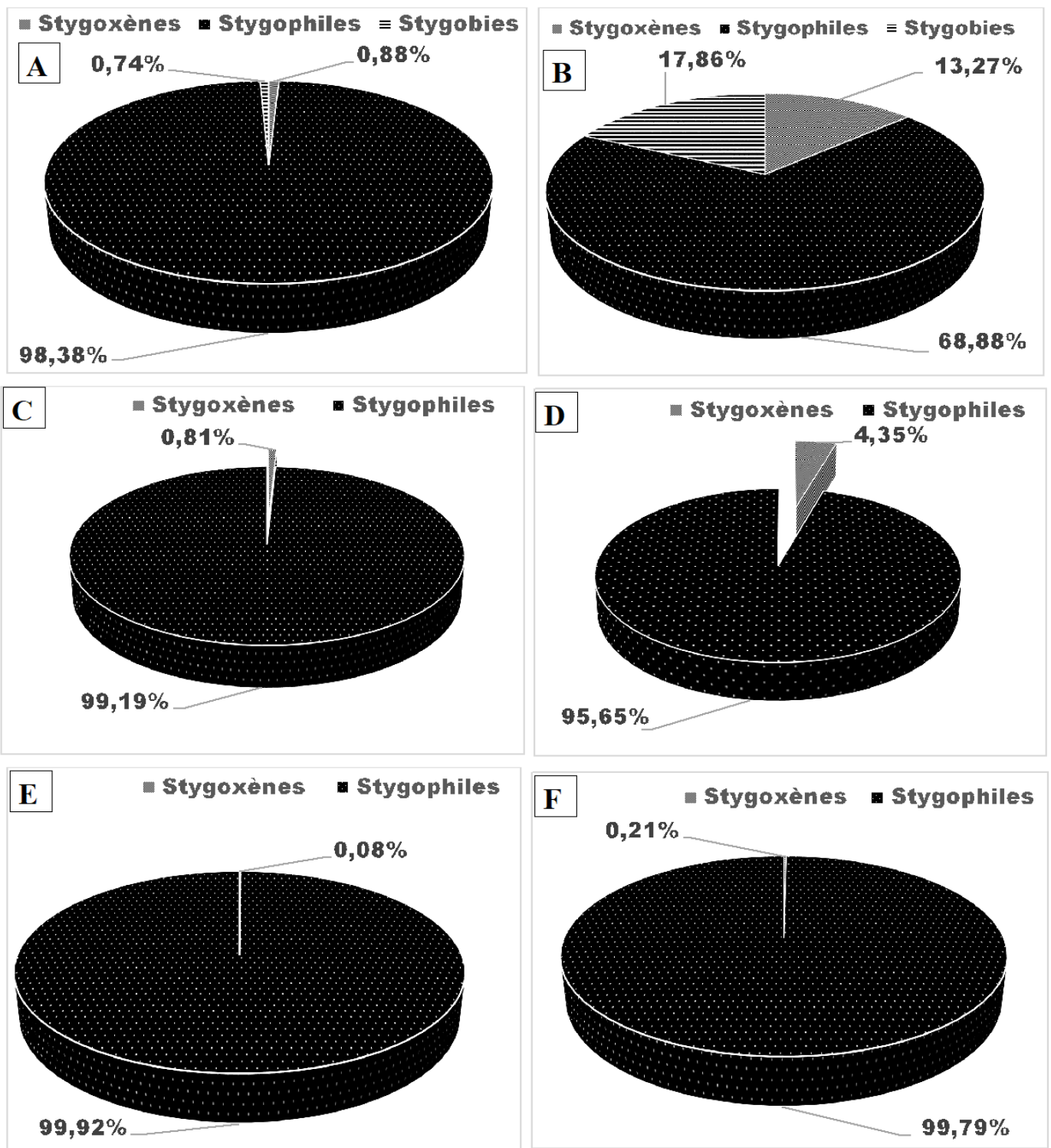


Figure 27 : Classification écologique de la faune aquatique souterraine de Douala
 A= Faune globale, B= PK 21, C= Ndogbong, D= Cité SIC, E= ZIBA, F= ZIBO.

III.1.2.4. Fréquence d'occurrence des taxa dans les différents sites d'étude

Les fréquences d'occurrence des taxa aquatiques souterrains ont été calculées dans les différents sites d'étude (**Figure 28**).

La faune souterraine de la zone périurbaine de PK 21 (**Figure 28A**) a été largement dominée par les taxa rares (60%) suivis des taxa constants (20%). Les taxa accessoires et réguliers représentent respectivement 13,33% et 6,67%. Les invertébrés rares sont constitués des familles de Lumbricidae, Naïdidae, Tubificidae, Lymnaeidae, Cyprididae, Libellulidae, Ceratopogonidae, Isotomidae et Hydracarinae. Les taxa constants sont constitués des familles de Lumbriculidae, Chironomidae et Formicidae. Les communautés accessoires sont représentées quant à elles par les familles de Cyclopidae et Culicidae, tandis que la famille de Stenasellidae représentée par l'espèce *Metastenasellus boutini* constitue le seul taxon régulier. Aucun taxon omniprésent n'a été obtenu dans ce site.

Dans le site de Ndogbong, la faune aquatique souterraine (**Figure 28B**) est composée des taxons accessoires (46%), constants (31%) et omniprésents (23%). Les taxa rares et réguliers n'ont pas été obtenus dans ce site. Les invertébrés accessoires sont représentés par les familles de Glossiphoniidae, Lymnaeidae, Oniscidae, Libellulidae, Elmidae et Dytiscidae. Les familles de Lumbricidae, Psychodidae, Ceratopogonidae et Formicidae sont des taxons constants enregistrés dans ce site. Les taxons omniprésents quant à eux sont constitués des familles de Lumbriculidae, Cyprididae et Chironomidae.

La faune aquatique souterraine de Cité SIC (**Figure 28C**) est dominée par les taxons accessoires (69%) ; constituée par les familles de Lumbricidae, Libellulidae, Gomphidae, Psychodidae, Ceratopogonidae, Isotomidae, Culicidae, Hydracarinae, Stratiomyidae, Dryopidae, Cyprididae et Formicidae. Les taxa constants constituent 25% de toute la faune de ce site et sont représentés par les familles de Naïdidae, Lumbriculidae, Cyprididae et Formicidae. La famille de Chironomidae (6%) est le seul taxon omniprésent enregistré. Les taxons rares et réguliers n'y ont pas été obtenus.

La stygofaune du site industriel de ZIBA (**Figure 28D**) est composée des taxa rares (35%), constants (29%), accessoires (24%) et réguliers (12%). Les invertébrés rares sont constitués de familles de Gordiacea, Tubificidae, Cytheridae, Cordulidae, Culicidae et Formicidae. Les taxons constants regroupent les familles de Naïdidae, Cyprididae, Cyclopidae, Ceratopogonidae et Psychodidae. Les familles de Lymnaeidae, Physidae, Isotomidae et Hydracarinae sont accessoirement retrouvées dans ce site.

Les taxons régulièrement retrouvés sont les familles de Lumbriculidae et Chironomidae. Aucun taxon omniprésent n'a été enregistré dans ce site.

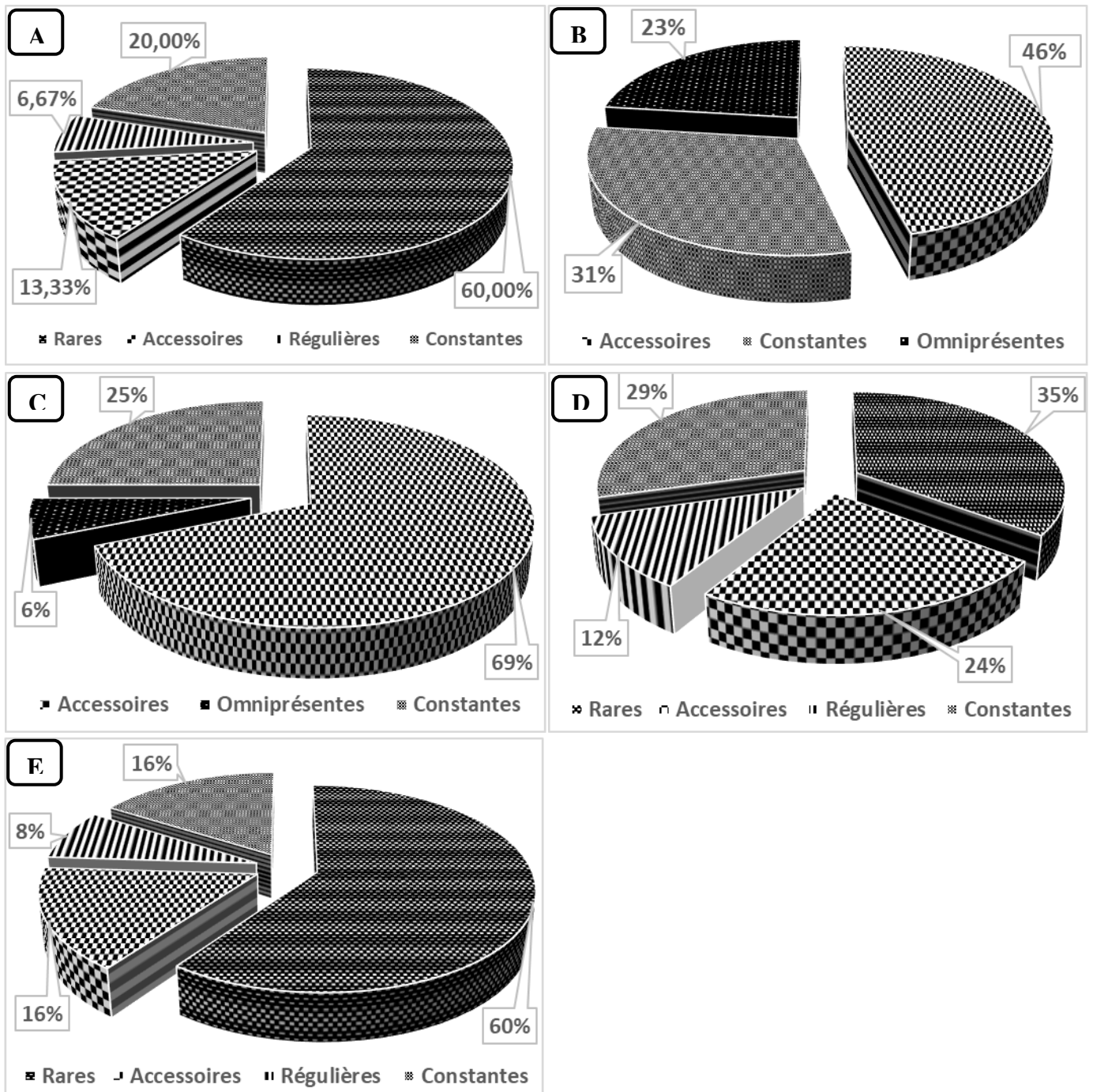


Figure 28 : Fréquences d'occurrence des taxons dans les différents sites durant la période d'étude. A= PK 21, B= Ndogbong, C= Cité SIC, D= ZIBA et E= ZIBO.

La faune aquatique souterraine de ZIBO (**Figure 28E**) est largement dominée par les taxons rares (60%) composés des familles de Gordiidae, Glossiphoniidae, Libellulidae, Gomphidae, Elmidae, Formicidae, Dytiscidae, Cordulidae, Culicidae, Hydrophilidae, Hygrobiidae, Hydracaridae, Stratiomyidae, Dryopidae et Ptychopteridae. Les taxons

accessoires (Physidae, Cyprididae, Ceratopogonidae, Isotomidae) et constants (Naididae, Lymnaeidae, Cyclopidae et Psychodidae) représentent chacun 16% de l'ensemble de la faune du site. Quant aux taxons réguliers (8%), ils sont constitués par les familles de Lumbriculidae et Chironomidae. Les taxons omniprésents y sont absents.

III.1.2.5. Variations spatiales de l'indice de diversité de Shannon-Weaver et de l'équitabilité de Piélu

La **figure 29** montre les variations spatiales de l'indice H' de diversité de Shannon et Weaver et de l'équitabilité J de Piélu dans les différents sites durant la période de l'étude.

L'indice de diversité de Shannon et Weaver a varié de 1,08 bits/Ind. (Ndogbong) à 3,21 bits/Ind. (Cité Sic). Les sites de PK 21, Cité SIC et ZIBO sont les plus diversifiés avec des indices H' de 3,19 bits/Ind., 3,21 bits/Ind. et 3,11 bits/Ind. respectivement. Le site de ZIBA est moyennement diversifié ($H' = 2,73$ bits/Ind.) tandis que le site de Ndogbong est faiblement diversifié ($H' = 1,08$ bits/Ind.) (**Figure 29**).

L'indice d'équitabilité de Piélu a varié de 0,21 (Ndogbong) à 0,63 (Cité SIC). Dans le site de Ndogbong, on note une domination d'un taxon sur l'ensemble des taxons enregistrés ($J < 0,5$), alors que dans les autres sites on a observé une répartition presque équitable ($J > 0,5$) des différents taxa répertoriés (**Figure 29**).

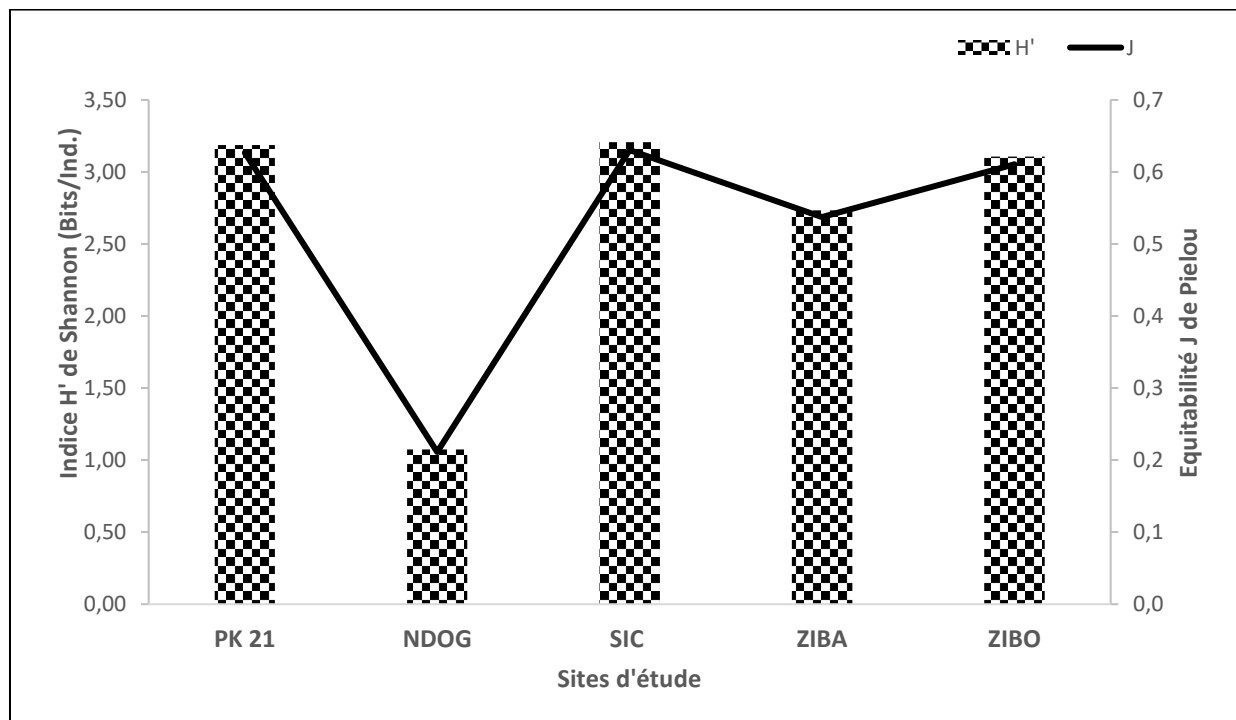


Figure 29 : Variations spatiales de l'indice de diversité de Shannon-Weaver et de l'équitabilité de Piélu

III.1.2.6. Faune stygobie

Les investigations morphologiques et biomoléculaires sur la faune stygobie de la ville de Douala ont montré que les eaux souterraines de PK 21 (site témoin) hébergent une nouvelle espèce stygobie de la famille de Stenasellidae, du genre *Metastenasellus*. La nouvelle espèce, *Metastenasellus boutini*, se distingue clairement des autres espèces connues décrites ou séquencées du genre.

III.1.2.6.1. Caractéristiques morphologiques

Diagnose :

Metastenasellus boutini (*n. sp.*) est caractérisée par les pléonites 1 et 2 environ 50% aussi longs que le pléonite 7, la présence d'une épine sternale sur chaque dactyle des péréiopodes 2-7 et l'endopodite du pléopode 2 chez les mâles est long et large avec un canal spermatique hélicoïdal.

Matériel examiné : Spécimen type : Holotype ♂ (9,8 mm), monté sur 2 lames et déposé au Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris (MNHN, France) sous le numéro de référence MNHN IU-2021-1818.

Localité type : Cameroun, dans le quartier PK 21, ville de Douala, 04°07'16 "N ; 09°49'41.4 "E, dans un puits à 60 m d'altitude, de 8 m de profondeur. Paratypes : 5 ♂ en flacons ; mêmes données que pour l'holotype ; MNHN IU-2021-1819 - 3 ♀ en flacons ; mêmes données que pour l'holotype ; MNHN IU-2021-1820.

Autre matériel examiné : 22 spécimens collectés dans sept puits autour de PK 21.

Étymologie : L'épithète *boutini* se réfère au nom du Pr. Claude Boutin qui a initié de nombreuses études sur la stygofaune en Afrique du Nord, de l'Ouest, Centrale et particulièrement au Cameroun.

Description du mâle. *M. boutini* sp. nov. (**Figure 30A**) est un Stenasellidae de taille relativement moyenne, longueur jusqu'à 11 mm chez les mâles. Céphalon court et arrondi avec une marge rostrale concave et convexe distalement. Péréonites 1 à 7 bien développés, les 6^{ème} et 7^{ème} étant les plus longs. Péréonites 1 et 2 libres et aussi longs que 50% de la longueur du péréonite 7. Pléotelson subrectangulaire avec un bord caudal pointu et recouvrant partiellement le protopodite de l'uropode.

Antenne 1 (Figure 30B) légèrement plus longue que le pédoncule de l'antenne 2, flagelle avec 12-15 articles, les 6 derniers portant chacun un seul *aesthetasc* distal (*lamina olfactoria*), les deux premiers articles du pédoncule sont plus longs que les autres et portent une et deux soies plumeuses sensorielles, respectivement.

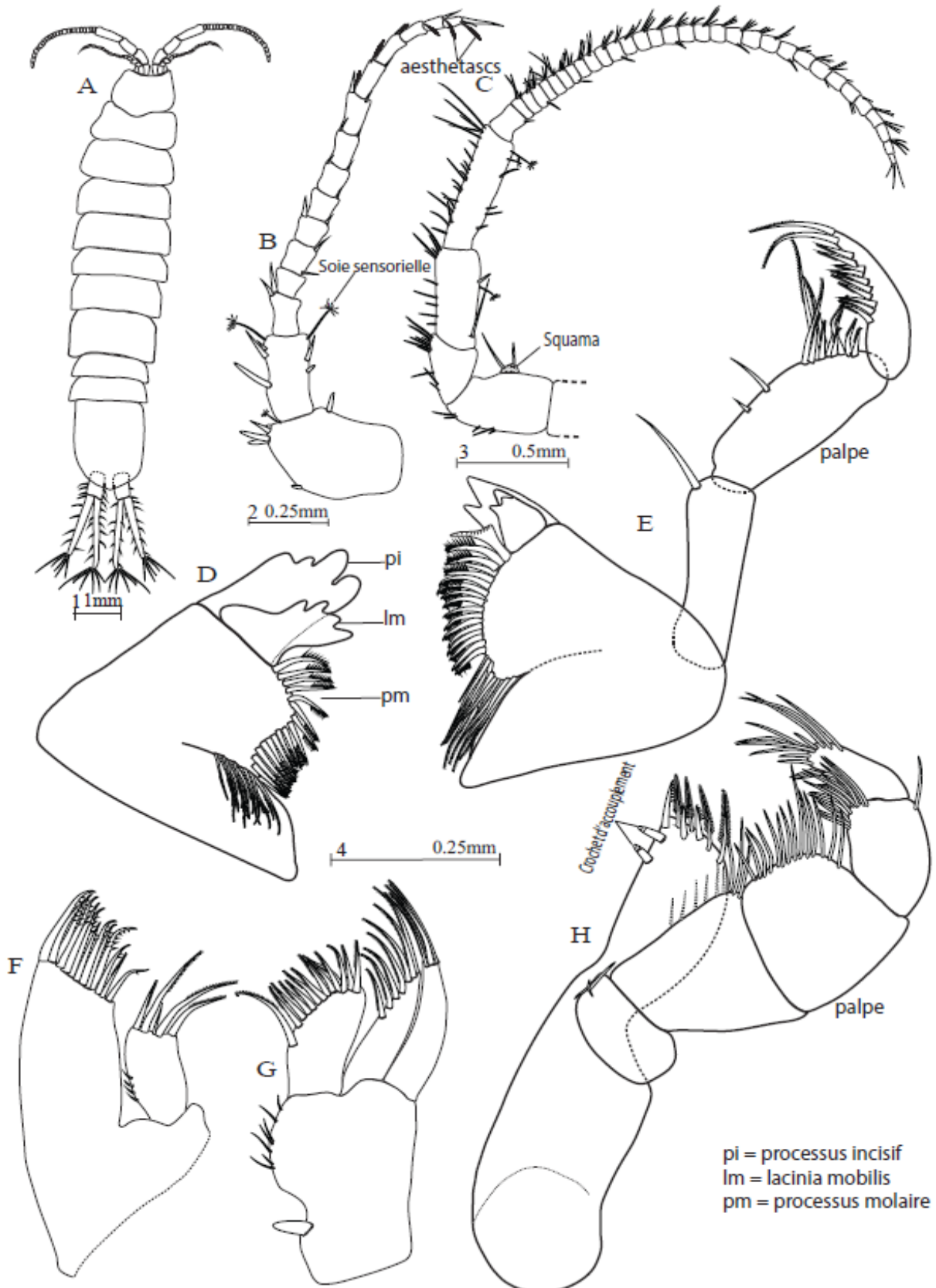


Figure 30 : *Metastenasellus boutini* (sp. nov.), ((A–H), ♂ holotype 9.8 mm) (A) Habitus (échelle 1) (B) Antenne 1 (échelle 2) (C) Antenne 2 (échelle 3) (D) Mandibule gauche (échelle 4) (E) Mandibule droite (échelle 4) (F) Maxille 1 (échelle 4) (G) Maxille 2 (échelle 4) (H) Maxillipède (échelle 4).

Antenne 2 (Figure 30C) représente environ 30% de la longueur du corps, elle est 2,5 fois plus longue que l'antenne 1, flagelle composé d'un nombre variable d'articles courts (32 à 48 articles pour les spécimens entre 9 et 10 mm), les articles 5 et 6 du pédoncule portant respectivement une et deux soies sensorielles; exopodite vestigial (squama) et en forme d'écaille sur le bord postérieur de l'article 3 avec une épine et une longue soie simple à l'apex.

Mandibules asymétriques, processus incisifs avec quatre dents ; **mandibule gauche (Figure 30D)** avec une *lacinia mobilis* bien développée avec quatre dents, suivie d'une rangée de 18 soies serrates et de 12 soies dentées ; **mandibule droite (Figure 30E)** avec une *lacinia mobilis* plus court à quatre dents, suivie d'une rangée de 18 soies serrates et de 12 soies dentées ; palpe tri-articulé, le premier article avec une soie distale simple et longue, le second avec deux soies simples et dix soies dentées unilatérales, le dernier article a 12 soies dentées unilatérales, les deux terminales étant plus longues.

Maxille 1 (Figure 30F). Endite clairement séparé de l'exite avec deux groupes de soies ciliées à l'apex séparés par une soie simple et quatre setules sur la marge externe ; exite avec 12 soies serrates apicales avec une à six dents et une soie ciliée.

Maxille 2 sympode (**Figure 30G**) portant sur sa marge médiane 7 soies simples et une soie forte ; endite avec 14 soies ciliées à l'apex, le lobe moyen avec 7 soies ciliées et l'exite externe avec 5 soies ciliées.

Maxillipède (Figure 30H). Endite avec 4 soies plumeuses, 3 soies serrates et une paire de crochets d'accouplement sur le bord médial; palpe penta-articulé, articles 2 et 3 nettement plus longs et plus forts que les trois autres, articles 1 à 5 portant de la base à l'apex 4, 9, 14, 14 et 2 soies simples sur le bord médial, article 4 avec une soie simple supplémentaire sur son bord externe, article 5 avec 10 soies simples apicales sur son bord externe.

Gnathopode (périopode 1) (Figure 31A) court, puissant avec une chaetotaxie dense et fortement armé sur la marge ventrale des quatre derniers articles ; basis avec 8 soies courtes sur la marge ventrale ; ischium subtrapézoïdal et portant deux soies sur chaque marge; merus et carpus subtriangulaires, portant sur la marge ventrale 5 et 6 longues soies, 2 et 7 soies en forme de stylo, respectivement, le merus portant 2 soies supplémentaires, longues et fortes, sur son extrémité externe; propodus élargi avec des soies simples alternant avec 9 soies dentées et 4 fortes soies denticulées proximales; dactylus armé de 7 soies dentées et de quelques soies simples sur sa partie ventrale et 8 à 10 soies simples sur la marge dorsale.

Péréiopodes 2 à 7 (Figures 31 B-D ; Figures 32A-C) typiquement ambulatoires, minces et plutôt longs, avec une chaetotaxie plus ou moins développée et une morphologie similaire avec des soies sensorielles sur la marge dorsale du basis, une armature forte de tous les articles avec des épines de différentes tailles et peu de soies, une épine sternale forte sur chaque dactylus ; les péréiopodes 2 (**Figure 31B**) et 6 (**Figure 32B**) portant également une soie sensorielle sur la partie distale du bord dorsal du propodus et du carpus, respectivement.

Pléopode 1 (Figure 33A) uniramé ; propodus subrectangulaire et convexe sur sa marge externe, glabre et sans rétinacle ; exopodite ovale, 2,5 fois plus long que large avec 17 soies distales, les 5 médianes étant les plus longues.

Pléopode 2 (Figure 33B) biramé, rames clairement séparées ; protopodite subpentagonal avec une partie distale oblique et un processus développé sur le bord externe, dépassant légèrement le premier segment de l'exopodite ; endopodite biarticulé, article proximal non clairement délimité et ankylosé au second, second article très développé, fusiforme et tordu, contenant un canal spermatique hélicoïdal avec une grande ouverture afférente proximale-interne et un orifice efférent distal plus petit, entouré de dents chitineuses ; exopodite, plus étroit que l'endopodite, biarticulé avec un second article arrondi, plus grand que le premier article avec une soie subterminale et 2 ou 3 soies externes marginales.

Pléopode 3 (Figure 33D) avec un protopodite très court ; endopodite plus petit que le premier article de l'exopodite et biarticulé, avec le second article, plus grand, ovale sur la partie distale ; exopodite également biarticulé, premier article long et subrectangulaire, portant sur sa marge externe 12 soies de taille variable ; deuxième article subtriangulaire, plus court que le premier et portant 4 soies proximales simples sur son bord externe et 4 soies apicales.

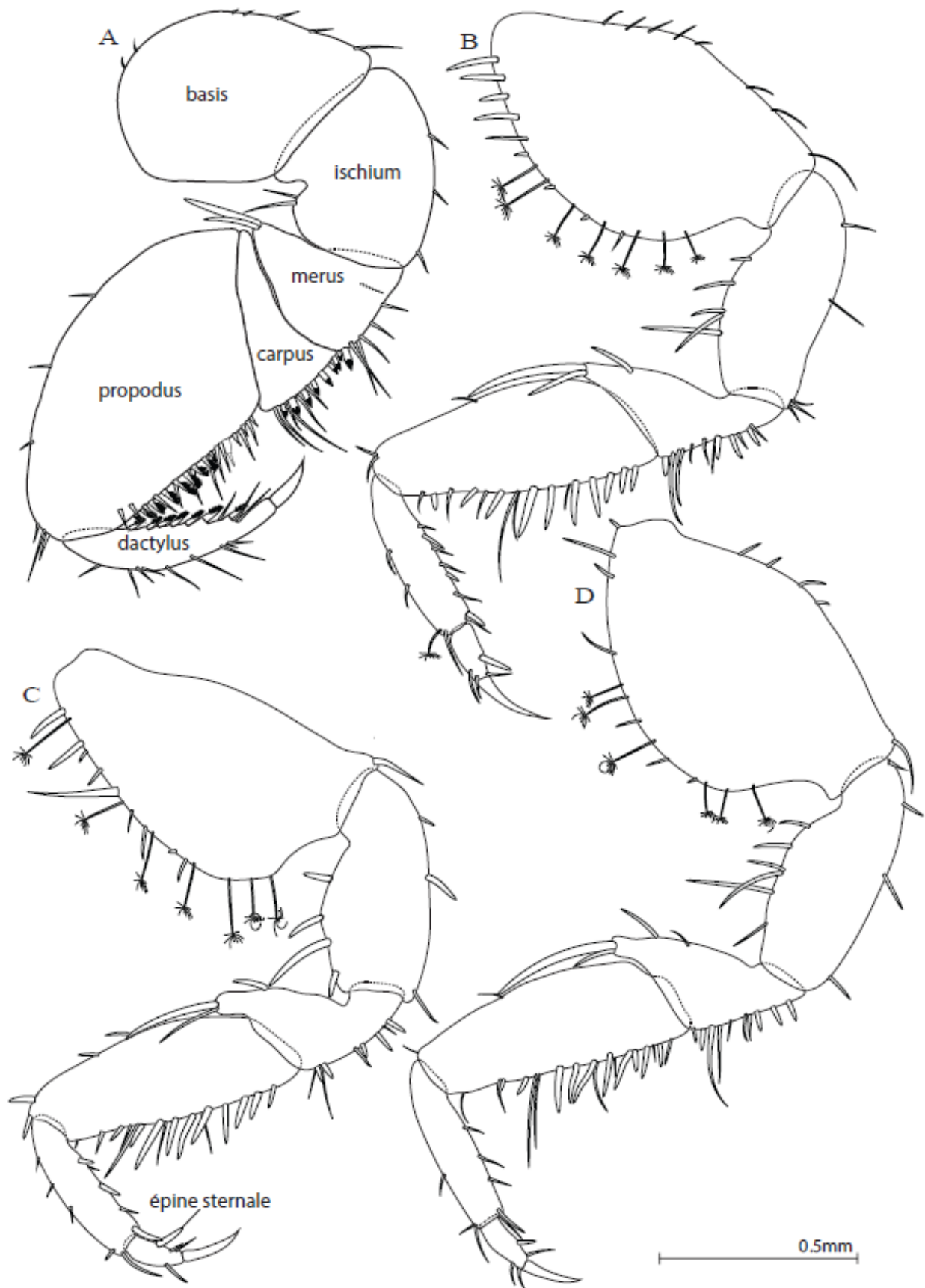


Figure 31 : *Metastenasellus boutini* (sp. nov.), ((A–D) ♂ holotype 9.8 mm) (A) péréiopode 1 (B) péréiopode 2 (C) péréiopode 3 (D) péréiopode 4.



Figure 32: *Metastenasellus boutini* (sp. nov.), ((A–C) ♂ holotype 9.8 mm) (A), péréiopode 5 (B) péréiopode 6 (C) péréiopode 7.

Pléopode 4 (Figure 33E) avec un protopodite court ; endopodite biarticulé avec le second article plus de 3 fois plus long que le premier; exopodite grand, glabre, avec une suture interarticulaire très oblique, le premier article étant beaucoup plus grand et plus large que le second.

Pléopode 5 (Figure 33F) avec un protopodite subrectangulaire ; endopodite biarticulé avec le deuxième article plus de 4 fois plus long que le premier ; exopodite biarticulé, légèrement plus long que l'endopodite ; premier article court, second article beaucoup plus grand et plus large que le premier.

Uropode (Figure 33G) biramé aussi long que le pléotelson ; protopodite subrectangulaire avec des soies dorsales et marginales ; endopodite légèrement plus long que l'exopodite, tous deux avec de nombreuses soies et épines et avec plusieurs longues soies apicales; soies sensorielles présentes seulement sur l'endopodite.

Femelles. Les femelles sont très similaires aux mâles avec une chaetotaxie réduite sur les uropodes. Elles sont légèrement plus longues que les mâles, leur taille pouvant atteindre 12 mm.

Pléopode 2 (Figure 33C) typique des femelles *Metastenasellus* formé par deux plaques simples subtriangulaires, avec des angles externes et distaux arrondis. Les marges latérales et apicales des plaques varient de concaves à convexes et portent quelques soies (0 à 3) chacune. Les plaques pléopodales gauche et droite se rejoignent sur 10% de leur partie proximale et sont bien séparées sur leur partie distale. Chaque plaque porte plusieurs (5 à 10) petites soies ventrales.

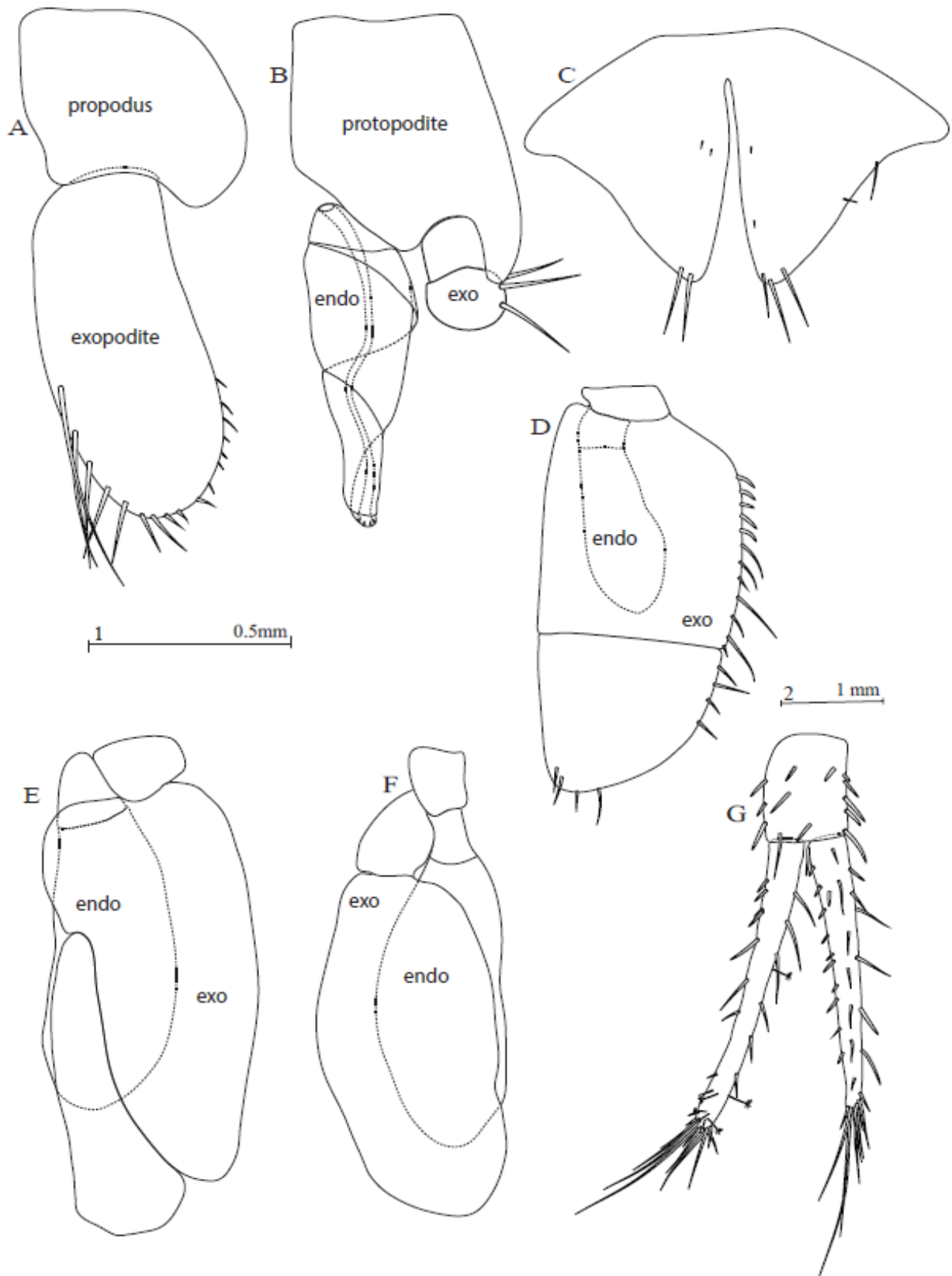


Figure 33 : *Metastenasellus boutini* (sp. nov.), ((A–B, D–G) holotype ♂ 9.8 mm (C) paratype ♀ 8 mm) : (A) pléopode 1 (échelle 1) (B) pléopode 2 (échelle 1) (C) pléopode 2 ♀ (échelle 1) (D) pléopode 3 (échelle 2) (E) pléopode 4 (échelle 1) (F) pléopode 5 (échelle 1) (G), uropode (échelle 2).

III.1.2.6.2. Caractéristiques biomoléculaires

Les molécules d'ADN de cinq individus provenant de quatre puits ont été séquencées et analysées, incluant la localité type de Douala (PK 21). Basé sur le fragment de Folmer du marqueur de COI, la nouvelle espèce est clairement distincte des autres espèces séquencées au Cameroun et au Bénin.

Les distances génétiques par paires entre *M. boutini* et toutes les autres espèces ont varié entre 22,4 et 27,8% pour les espèces camerounaises (*Metastenasellus camerounensis*, *Metastenasellus* sp1 et sp2) et même 28,2% pour l'espèce du Bénin (*Metastenasellus* sp3) (**Figure 34**). En plus de la distance génétique et de la distinction morphologique, toutes les méthodes de délimitation ont clairement mis en évidence l'existence d'au moins cinq lignées distinctes de *Metastenasellus* dans le matériel disponible pour l'Afrique (**Figure 34**). Toutes les méthodes de délimitation (ASAP, ABGD, mPTP et GMYC) ont confirmé que les individus provenant des puits de PK 21 appartiennent à la même lignée. Par conséquent et en plus de la distinction morphologique, les données moléculaires soutiennent l'hypothèse que *M. boutini* peut être considérée comme une nouvelle espèce, qui diffère fortement de *M. camerounensis* et des deux autres espèces déjà séquencées au Cameroun indiquées comme *Metastenasellus* sp1 et sp2.

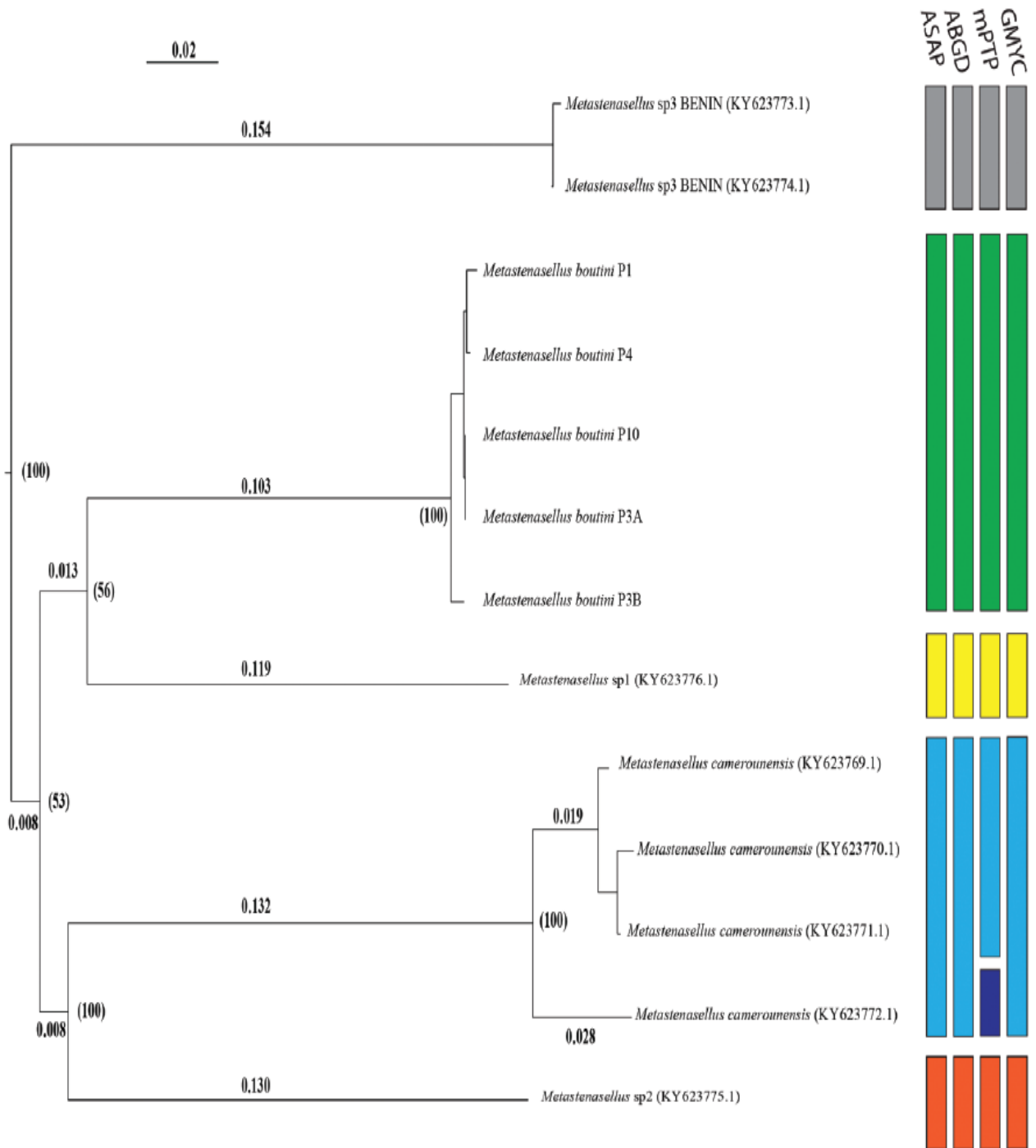


Figure 34 : Arbre de voisinage des haplotypes identifiés du gène COI. Les distances évolutives ont été calculées à l'aide du modèle à deux paramètres de Kimura (K2P). Les nombres entre parenthèses devant les nœuds indiquent le soutien bootstrap (1 000 répliques). Les cases sur la droite indiquent la meilleure partition des espèces en utilisant les méthodes de délimitation ASAP, ABGD, mPTP et GMYC.

III.1.2.7. Biotypologie des sites

La carte auto-organisatrice de Kohonen (SOM : Self-Organizing Maps) réalisée sur la matrice d'abondance des taxons aquatiques souterrains récoltés a permis de classer les 164 échantillons (41 puits \times 4 campagnes) en tenant compte de la distribution et de la probabilité d'occurrence des taxa dans les échantillons. Sur la base des valeurs minimales des erreurs de quantification et de topographie (**Tableau XXV**), une carte de Kohonen de 72 cellules (9 lignes \times 8 colonnes) a été retenue pour projeter les échantillons.

Tableau XXV : Différentes tailles de carte de Kohonen et les erreurs de quantification et de topographie correspondantes ; NB : la taille retenue et ses caractéristiques sont en gras

Taille de la carte	Erreur de quantification	Erreur de topographie
40 (8 \times 5)	0,487	0,037
48 (8 \times 6)	0,486	0,037
54 (9 \times 6)	0,483	0,030
63 (9 \times 7)	0,475	0,030
72 (9 \times 8)	0,454	0,000

Par la suite, une classification hiérarchique a été réalisée pour regrouper les 72 cellules de la carte auto-organisatrice de Kohonen selon leurs affinités taxonomiques et déterminer les limites entre les groupes formés. Ces cellules sont réparties en trois (03) groupes (I à III) à la distance euclidienne 1,35 selon la méthode de Ward (**Figure 35**).

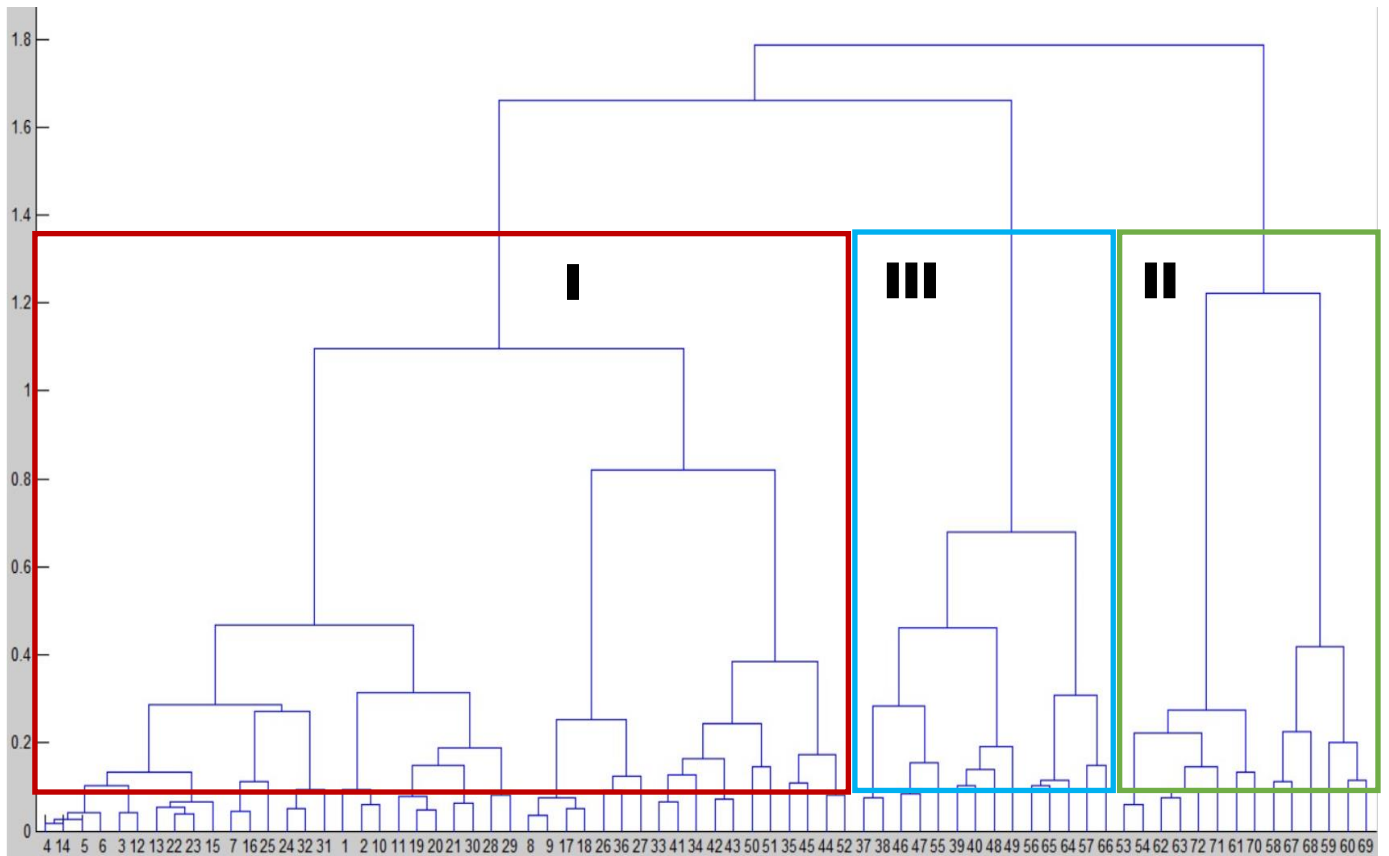


Figure 35 : Classification hiérarchique des cellules de la SOM par la méthode de Ward ; I, II et III= groupes identifiés ; les nombres 1 à 72 correspondent aux numéros de cellules de la carte SOM.

La carte de Kohonen (**Figure 36**) montre la distribution des 164 échantillons dans les différents groupes. Le groupe II est constitué de 26 échantillons tous récoltés dans la zone urbaine industrialisée, dont 5 récoltés à Ndogbong (2 en saison de pluies et 3 en saison sèche), 3 de Cité SIC (2 en saison de pluies et 1 en saison sèche), 12 de ZIBA (équitablement durant les deux saisons) et 6 de ZIBO (4 et 2 respectivement en saison de pluies et saison sèche). Le groupe III réunit 19 échantillons dont 1 de PK 21 et 1 de Cité SIC durant la saison de pluies, 12 à ZIBA (équitablement durant les deux saisons) et 5 de ZIBO récoltés durant la saison sèche. Le groupe I, rassemble les 119 autres échantillons récoltés dans tous les sites d'étude dont presque tous les échantillons (39) du site périurbain de PK 21, 7 de Ndogbong, 8 de Cité SIC, 36 de ZIBA et 29 de ZIBO.

Tableau XXVI : Récapitulatif saisonnier du nombre d'échantillons récoltés et distribués dans les trois groupes de la carte SOM dans les différents sites d'étude.

Groupes Sites	Groupe I		Groupe II		Groupe III		Total
	SP	SS	SP	SS	SP	SS	
PK 21	19	20	0	0	1	0	40
Ndogbong	4	3	2	3	0	0	12
SIC Cacaos	3	5	2	1	1	0	12
ZIBA	18	18	6	6	6	6	60
ZIBO	15	14	4	2	0	5	40
Total	59	60	14	12	8	11	164

SP= Saison de pluies et SS= Saison sèche

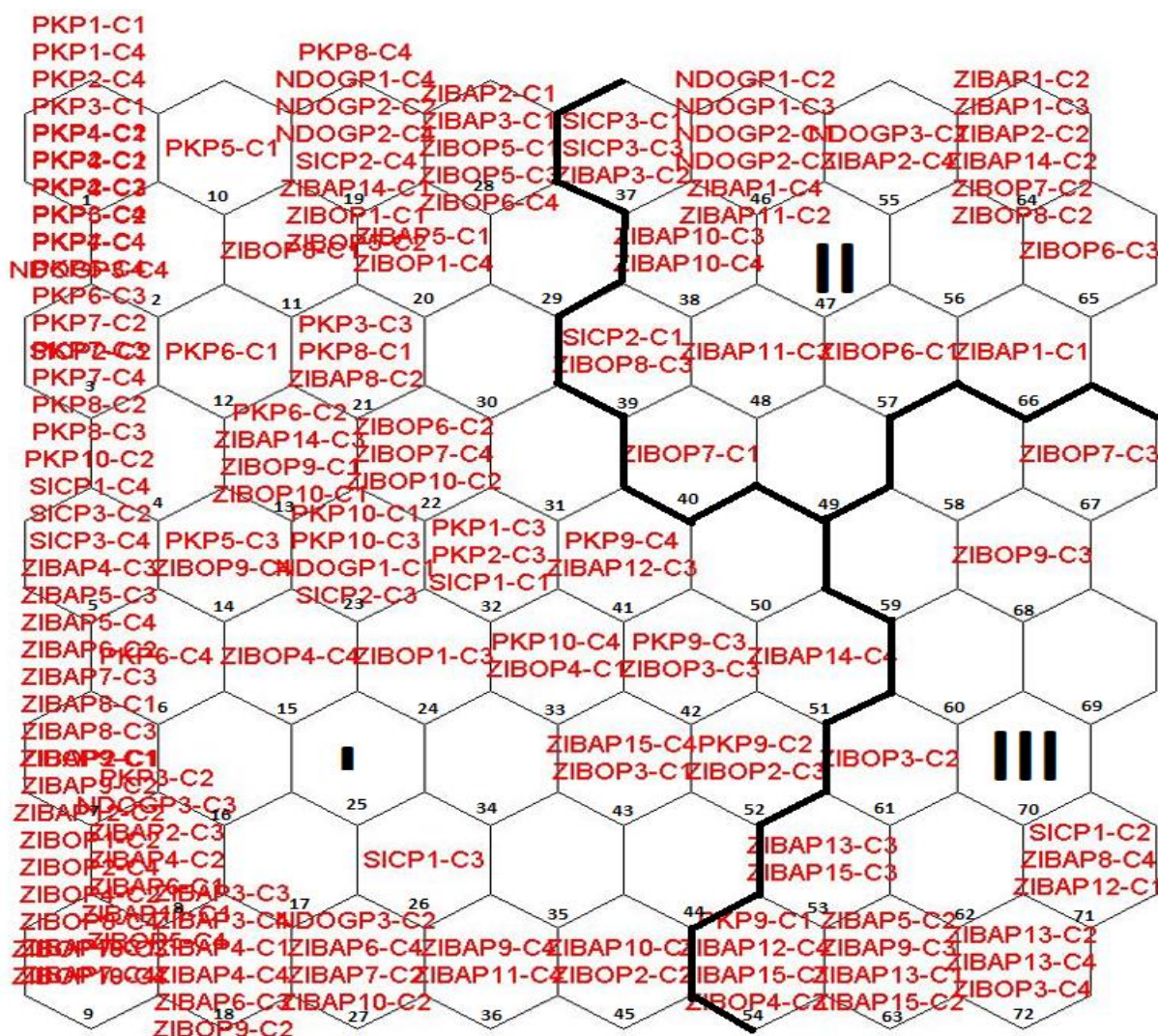


Figure 36 : Distribution des échantillons sur la carte SOM à partir de la matrice d'abondance des taxa aquatiques souterrains : I à III = groupes identifiés ; PK, SIC, NDOG, ZIBA et ZIBO = Sites d'étude ; PKP1 à PKP10, NDOGP1 à NDOGP3, SICP1 à SICP2, ZIBAP1 à ZIBAP15, ZIBOP1 à ZIBOP10= Stations ; C1, C2, C3 et C4= Campagnes d'échantillonnage ; les chiffres arabes 1 à 72 à la base de chaque hexagone correspondent aux numéros des cellules de la SOM.

La **figure 37** (A, B et C) présente le profil de la probabilité de distribution de chaque taxon aquatique souterrain recensé dans les groupes définis par la SOM. La synthèse de cette répartition (**Figure 38**) montre que les groupes II et III enregistrent la plus forte richesse taxonomique avec 27 et 28 taxons respectivement, alors que le groupe I est le moins riche avec seulement 24 taxons recensés pendant la période d'étude.

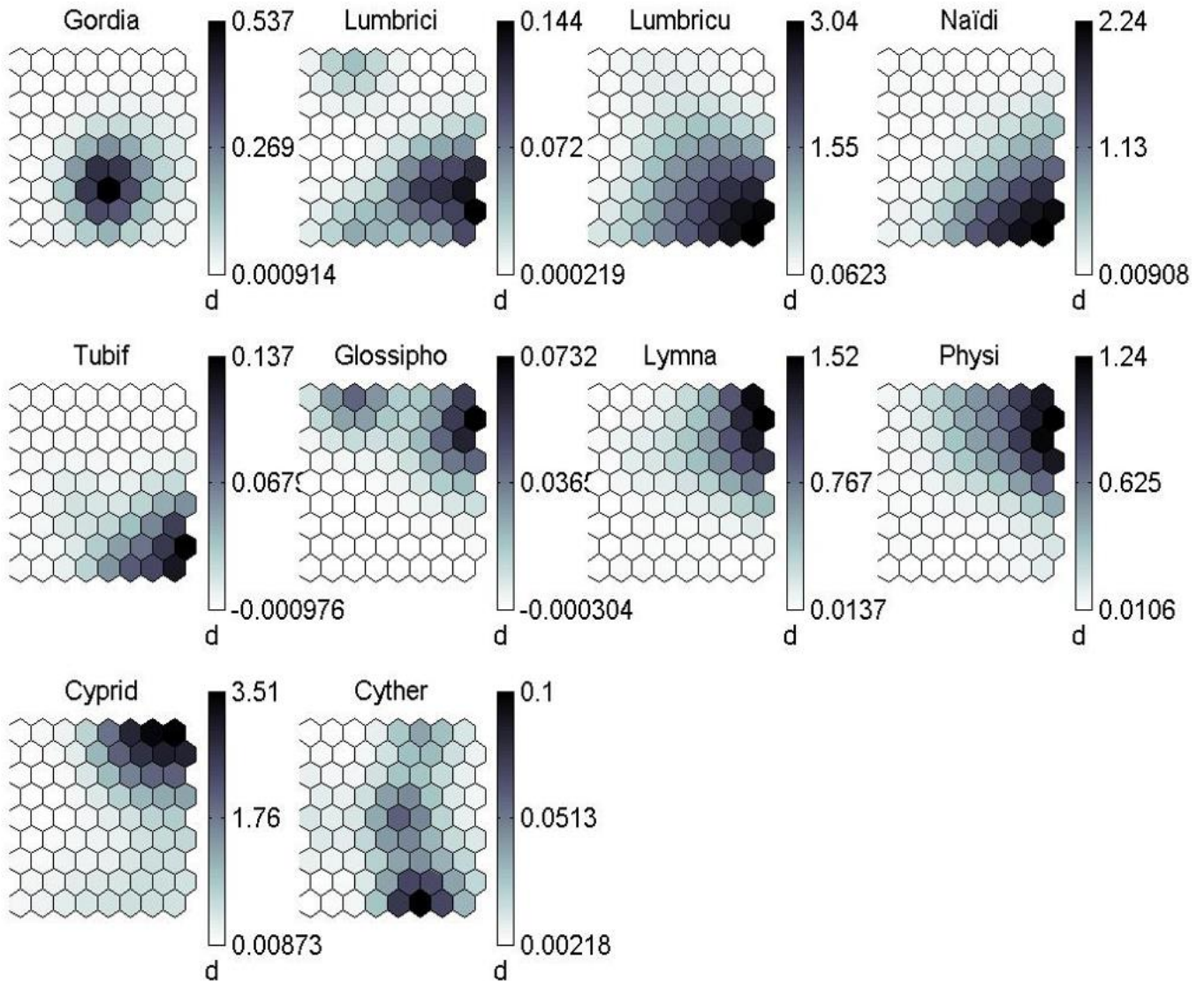


Figure 37 A: Patron de distribution des taxa récoltés sur la carte SOM, réalisé à partir de la matrice d'abondance : couleur sombre = forte probabilité de présence ; couleur claire = faible probabilité de présence ; d = échelle. Gordia= Gordiacea, Lumbrici = Lumbricidae, Lumbricu= Lumbriculidae, Naïdi= Naïdidae, Tubif = Tubificidae, Glossipho = Glossiphoniidae, Lymna = Lymnaeidae, Physi= Physidae, Cyprid = Cyprididae, Cyther = Cytheridae

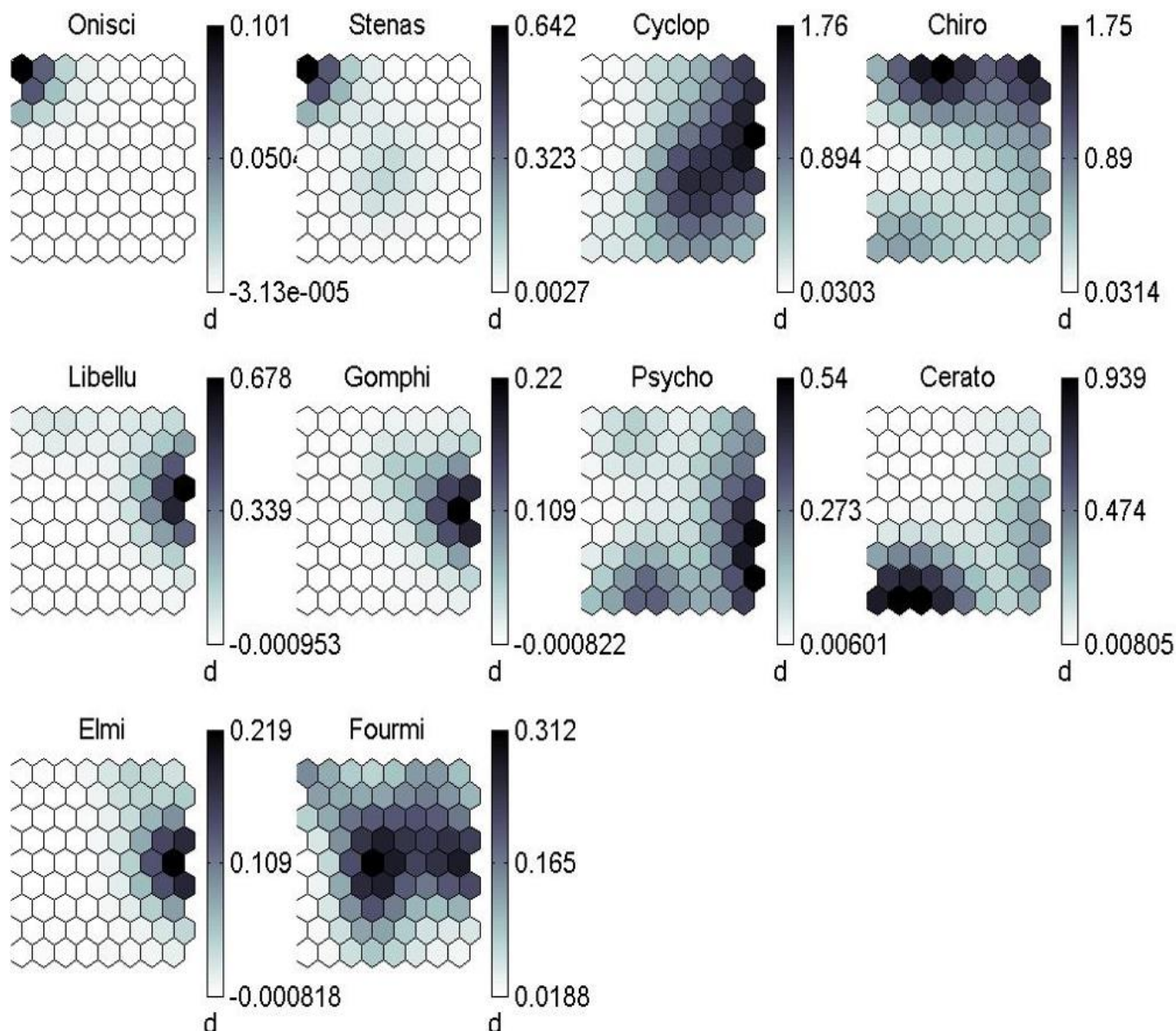


Figure 37 B : Patron de distribution des taxa récoltés sur la carte SOM, réalisé à partir de la matrice d'abondance : couleur sombre = forte probabilité de présence ; couleur claire = faible probabilité de présence ; d = échelle. Onisci = Oniscidae, Stenas = Stenasellidae, Cyclop = Cyclopidae, Chiro = Chironomidae, Libellu = Libellulidae, Gomphi = Gomphidae, Psycho = Psychodidae, Cerato = Ceratopogonidae, Elmi = Elmidae, Formi = Formicidae

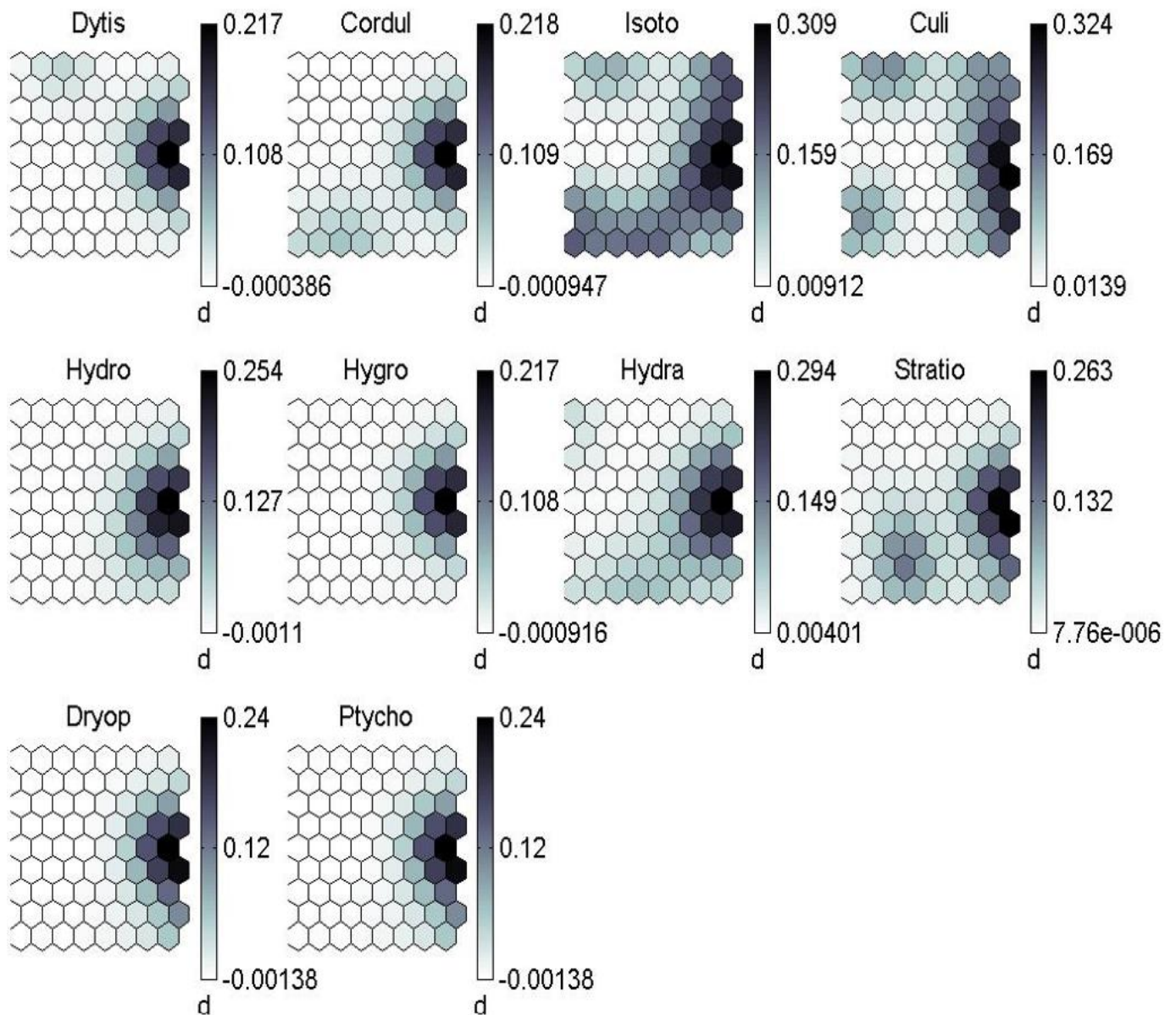
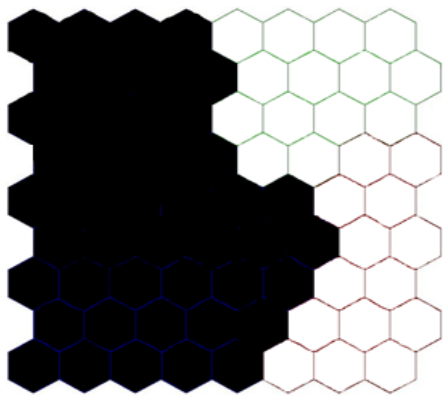
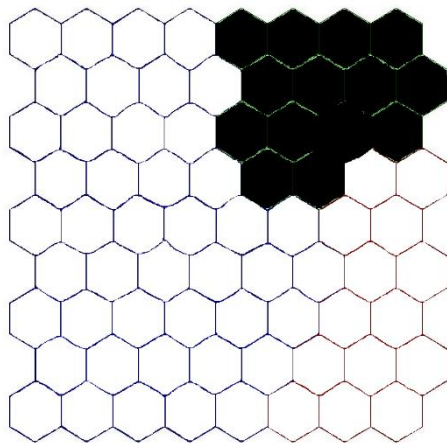


Figure 37 C: Patron de distribution des taxa récoltés sur la carte SOM, réalisé à partir de la matrice d'abondance : couleur sombre = forte probabilité de présence ; couleur claire = faible probabilité de présence ; d = échelle. Dytis = Dytiscidae, Cordul = Cordulidae, Isoto = Isotomidae, Culi = Culicidae, Hydro = Hydrophilidae, Hygro= Hygrobiidae, Hydra = Hydracaridae, Stratio = Stratiomyidae, Dryop = Dryopidae, Ptycho = Ptychopteridae



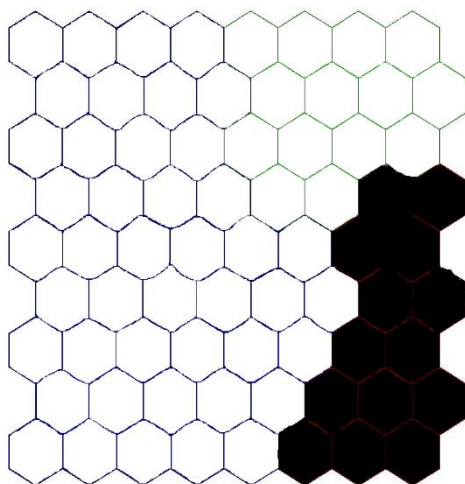
Groupe I

Gordiacea ; Lumbricidae ; Lumbriculidae; Naïdidae;
 Tubificidae; Glossiphoniidae; Lymnaeidae; Physidae;
 Cyprididae; Cytheridae; Oniscidae; Stenasellidae;
 Cyclopidae; Chironomidae ; Libellulidae; Psychodidae;
 Ceratopogonidae; Fourmicidae; Dytiscidae; Cordulidae;
 Isotomidae; Culicidae; Hydracarinae; Stratiomyidae



Groupe II

Gordiacea ; Lumbricidae ; Lumbriculidae; Naïdidae;
 Glossiphoniidae; Lymnaeidae; Physidae; Cyprididae;
 Cytheridae; Cyclopidae; Chironomidae ; Libellulidae;
 Gomphidae; Psychodidae; Ceratopogonidae; Elmidae;
 Fourmicidae; Dytiscidae; Cordulidae; Isotomidae;
 Culicidae; Hydrophilidae; Hygrobiidae; Hydracarinae;
 Stratiomyidae; Dryopidae; Ptychopteridae



Groupe III

Gordiacea ; Lumbricidae ; Lumbriculidae; Naïdidae;
 Tubificidae; Glossiphoniidae; Lymnaeidae; Physidae;
 Cyprididae; Cytheridae; Cyclopidae; Chironomidae ;
 Libellulidae; Gomphidae; Psychodidae;
 Ceratopogonidae; Elmidae; Fourmicidae; Dytiscidae;
 Cordulidae; Isotomidae; Culicidae; Hydrophilidae;
 Hygrobiidae; Hydracarinae; Stratiomyidae; Dryopidae;
 Ptychopteridae

Figure 38 : Distribution des taxa aquatiques souterrains dans les différents groupes définis par la SOM illustrée par la **figure 35**

Des 24 taxons recensés dans le groupe I, les Isopodes terrestres (famille des Oniscidae) et stygobies de la famille des Stenasellidae y sont spécifiques. On y note l'absence de six (06) taxons : Gomphidae ; Elmidae ; Hydrophilidae; Hygrobiidae ; Dryopidae; Ptychopteridae. Des 27 et 28 taxons enregistrés dans les groupes II et III respectivement, aucun ne leur est

spécifique. Les familles des Oniscidae et Stenasellidae y sont absentes. Les Oligochètes de la famille de Tubificidae sont absents dans le groupe II.

La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) a permis de rassembler les sites dans trois (03) groupes aux caractéristiques biotiques similaires (**Figure 39**). Le groupe I, représenté en bleu, est constitué des sites de Ndogbong, PK 21 et de Cité SIC. Le site périurbain de PK 21 présente une faune plus proche de celles de Cité SIC et de Ndogbong. Ce groupe est significativement corrélé ($p < 0,05$) à la famille de Lymnaeidea. Le groupe II (en jaune) formé du site urbain industrialisé de ZIBA, est significativement et positivement corrélé aux familles de Cytheridae, Ceratopogonidae et Naïdidae ($p < 0,05$). Le groupe III (en gris) quant à lui est constitué du site urbain industrialisé de ZIBO et est significativement et positivement corrélé aux familles d'Hygrobiiidae, Hydrophilidae, Gordiacea, Libellulidae, et Physidae.

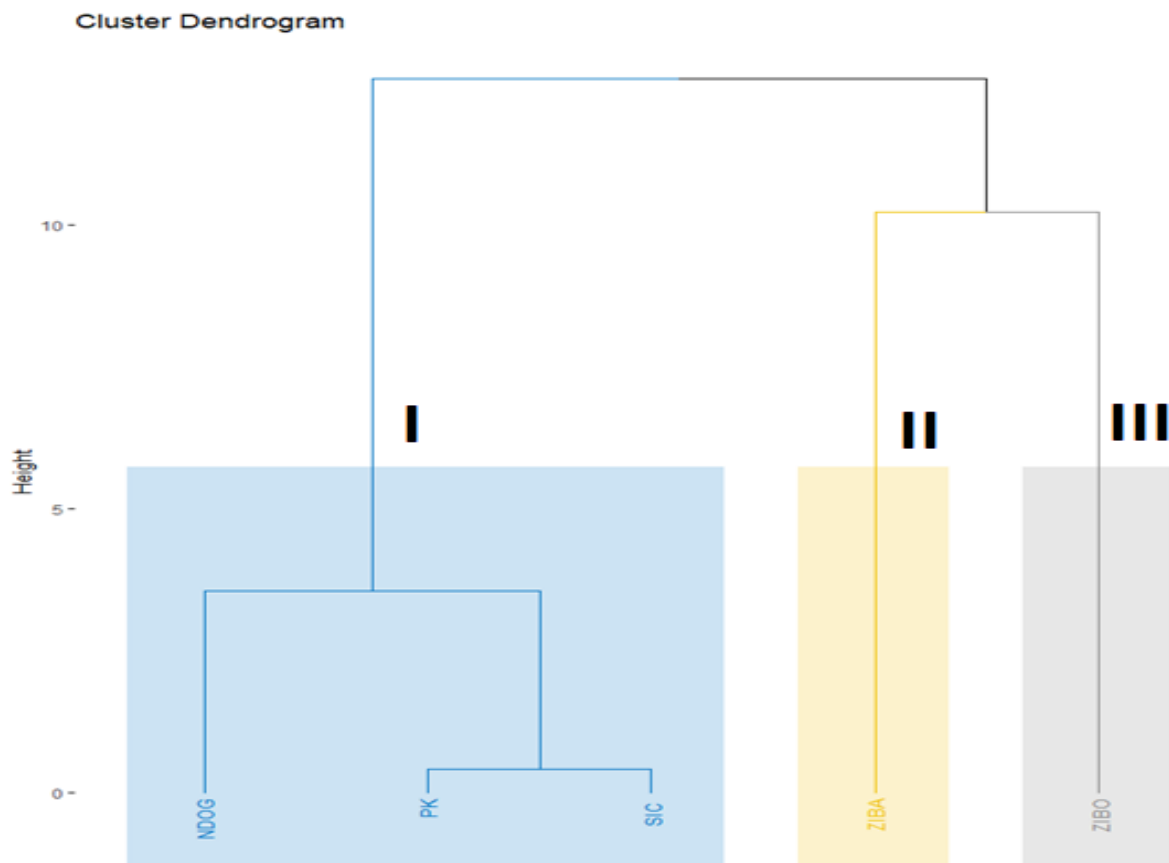


Figure 39 : Hiérarchisation des sites d'étude à partir de la faune enregistrée pendant la période d'étude ; NB : les chiffres romains I, II et III désignent les groupes constitués.

Une Analyse en Composantes Principales (ACP) réalisée à partir des données biotiques (**Figure 40**), a permis de relever les différentes corrélations existantes et de regrouper les sites d'étude en fonction de leurs affinités. Les dimensions Dim 1 (44,7%) et Dim2 (32,9%) ont été considérées, car elles cumulent 77,6% de l'inertie totale. La **figure 40B** illustre le cercle de

corrélations qui existent entre les différents paramètres abiotiques. Trois (03) principaux groupes ont été formés (**figure 40C**).

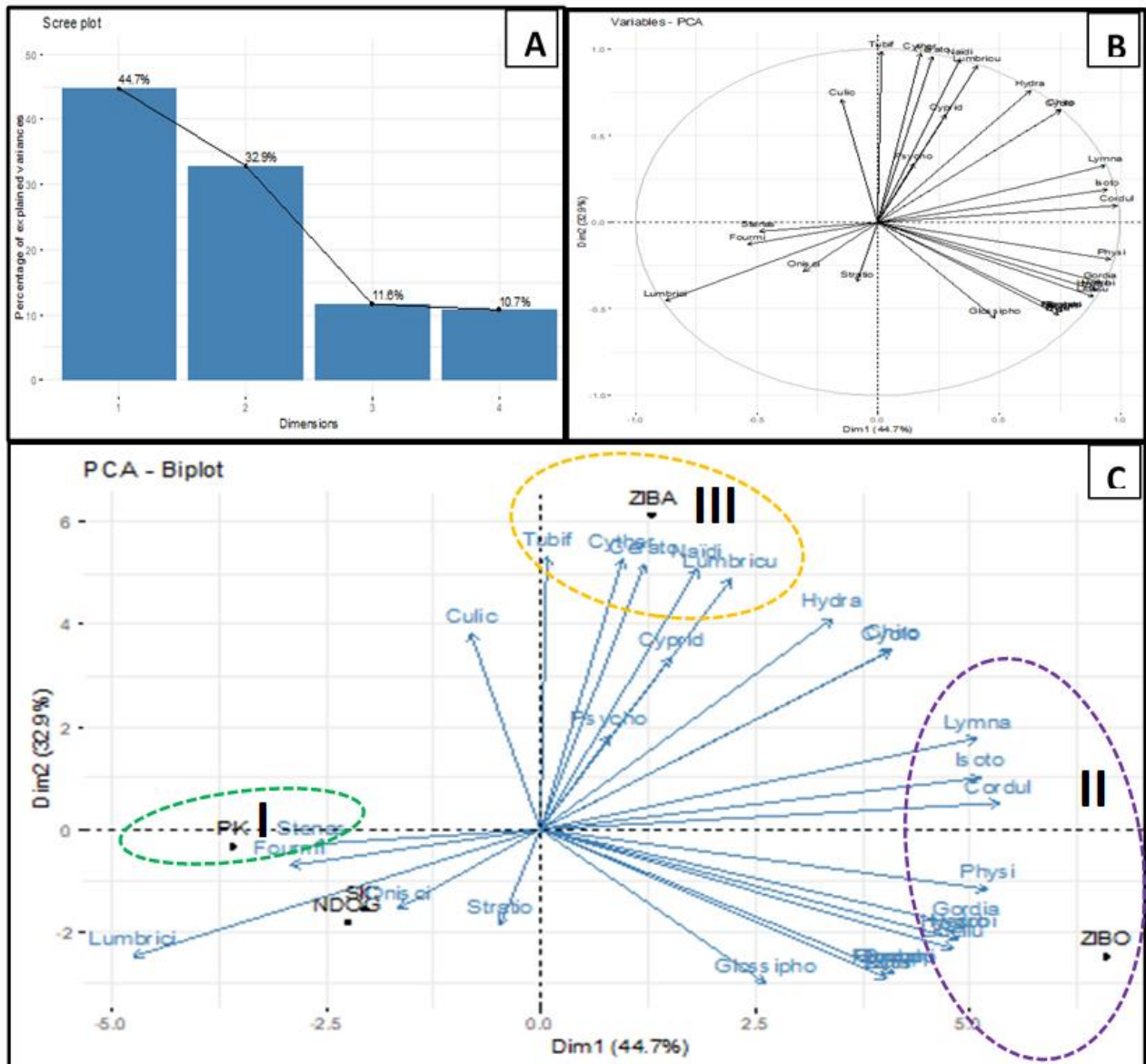


Figure 40: Analyse en Composantes Principales (ACP) effectuée sur la faune aquatique souterraine enregistrée dans les différents sites d'étude : (A) Histogramme des valeurs propres, (B) cercle de corrélations ; (C) Biplot montrant les corrélations et la distribution des taxons sur les dimensions Dim1 * Dim2.

Le **groupe I** montre que dans le site périurbain de PK 21, les Isopodes stygobies de la famille de Stenasellidae (Stenas) et les fourmis sont significativement et positivement corrélés ($p < 0,05$) entre eux. Le site industriel de ZIBO, les familles Hydrophilidae, Hygrobiidae, Isotomidae, Cordulidae, Libellulidae, Lymnaeidae, Physidae, Gordiacea, inclus dans le **groupe II** sont d'une part significativement et positivement corrélés ($p < 0,05$) entre eux et à la dimension 1 et d'autre part, significativement et négativement corrélés au groupe I. Enfin, le

groupe III montre que le site industriel de ZIBA, les familles de Lumbriculidae, Naïdidae, Tubificidae, Cytheridae et Ceratopogonidae sont significativement et positivement corrélés ($p < 0,05$) entre eux.

III.1.2.8. Résultats de la PERMANOVA réalisée sur les données biotiques

L'analyse des variances réalisée avec les données biotiques montre une variabilité significative ($p < 0,01$) de la faune des différents sites d'étude (**Tableau XXVII**). Aucune différence significative ($p > 0,05$) n'a été observée entre les saisons. De plus, aucune interaction entre les sites et les saisons n'a été enregistrée.

La comparaison deux à deux montre que la faune de la zone périurbaine de PK 21 est significativement différente ($p < 0,01$) de celles de Ndogbong, de ZIBA et de ZIBO ; mais semblable à celle de Cité SIC ($p > 0,05$). La faune de ce dernier site n'est pas significativement différente ($p > 0,05$) de celles de Ndogbong, ZIBA et ZIBO. La faune de Ndogbong présente une faune significativement différente ($p < 0,01$) de celle enregistrée dans les zones industrielles (ZIBA et ZIBO). Ces sites industriels ont des faunes significativement différentes ($p < 0,05$) entre elles.

Tableau XXVII : Résultats de l'analyse PERMANOVA des données biotiques enregistrées dans les différents sites d'étude

Résultats de la PERMANOVA						
Source	df	SS	MS	Pseudo-F	P (perm)	Unique perms
Site	4	43253	10813	3.8287	0.001**	998
Saison	1	3284.9	3284.9	1.1631	0.316	999
Site x Saison	4	11707	2926.8	1.0363	0.426	996
Res	67	1.8922E5	2824.2			
Total	76	2.494E5				

Groups	t	P (perm)	Unique perms
PK 21, NDOG	2.194	0.001**	999
PK 21, SIC	1.3013	0.074	998
PK 21, ZIBA	2.7617	0.001**	998
PK 21, ZIBO	2.29	0.001**	998
NDOG, SIC	1.3979	0.133	985
NDOG, ZIBA	1.7748	0.015*	999
NDOG, ZIBO	2.1031	0.001**	998
SIC, ZIBA	1.2955	0.115	999
SIC, ZIBO	1.3431	0.072	999
ZIBA, ZIBO	1.4635	0.046*	998

* = Corrélation significative à 0,05 ; ** = Corrélation significative à 0,01 :

III.1.2.9. Structure de la faune aquatique souterraine enregistrée

L'Analyse en Coordonnées Principales (PCoA-Principal Coordinates Analysis) réalisée sur la faune aquatique souterraine montre que la structure de la faune est hétérogène, bien que la faune de la zone périurbaine de PK 21 semble se détacher de celles de zones urbaines industrialisées (**Figure 41**). La PCoA n'explique que 37,7% de l'ensemble de la faune enregistrée.

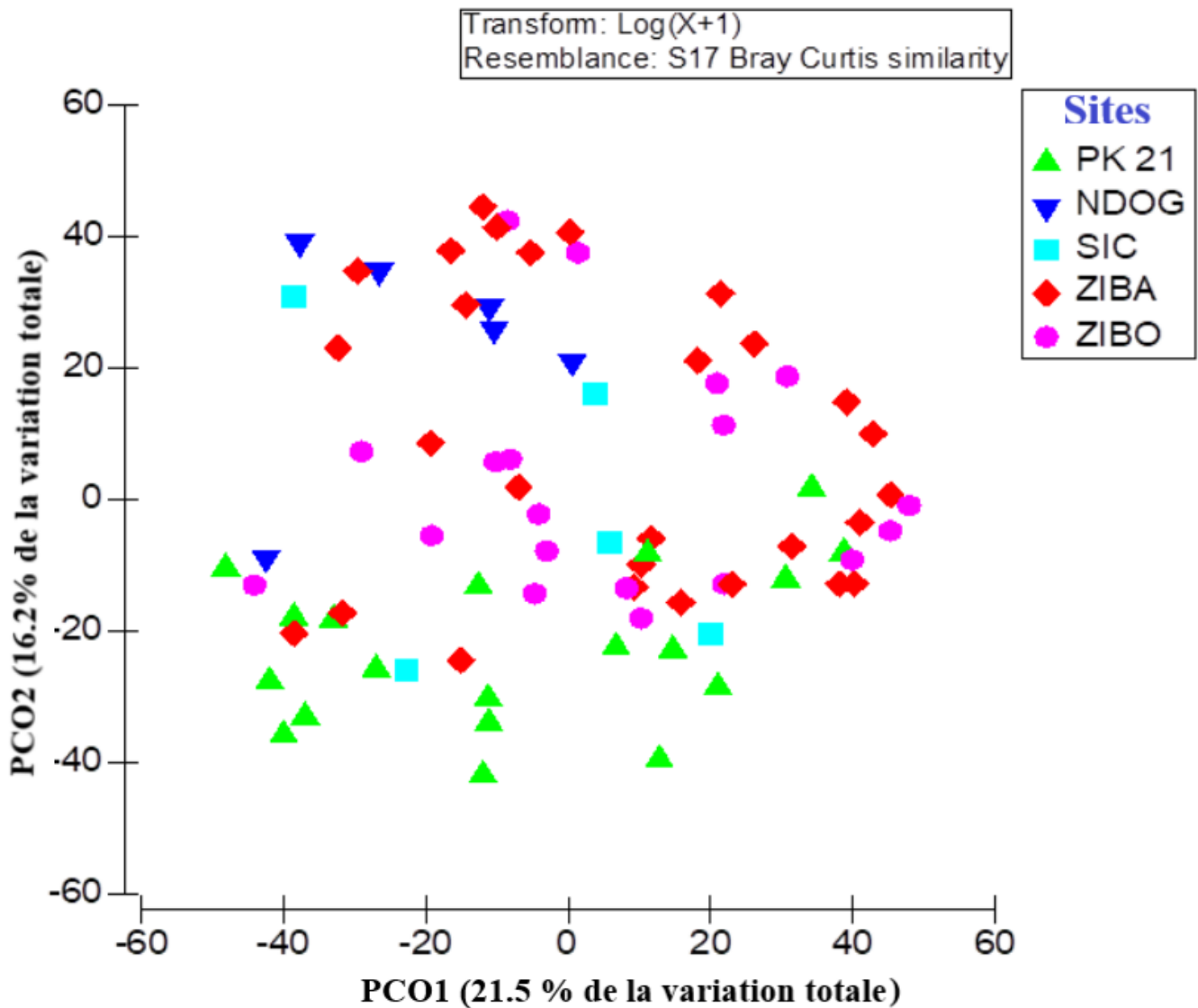


Figure 41 : Résultats de la PCoA réalisée sur la faune aquatique souterraine récoltée. PK 21, NDOG, SIC, ZIBA et ZIBO désignent les sites d'étude.

III.1.3. Relation entre les paramètres abiotiques de l'eau et la stygofaune

Dans le but d'établir l'influence des variables environnementales sur l'abondance et la distribution des principaux taxa aquatiques souterrains inventoriés dans la zone d'étude, les corrélations r de Spearman ont été recherchées, une régression linéaire multiple multivariée (DistLM- Distance based linear models) et une analyse de redondance basée sur la distance (dbRDA - Distance based redundancy analysis) ont été effectuées.

III.1.3.1. Corrélations r de Spearman

Les résultats des corrélations r de Spearman sont illustrés dans le tableau de l'Annexe X. Des trente (30) familles obtenues durant la période de l'étude, vingt-quatre (24) ont été corrélées aux paramètres abiotiques.

La famille des Gordiacaee a présenté des corrélations significatives et négatives avec les teneurs en ions orthophosphates ($r = -0,185^*$), l'azote ammoniacal ($r = -0,156^*$) et le Magnésium ($r = -0,169$) et positive avec le silicium ($r = 0,155^*$).

Les Oligochètes Lumbricidae ont été significativement et négativement corrélés à la température, à la couleur et au silicium ($r = -0,204^*$, $r = -0,181^*$ et $r = -0,197^*$ respectivement). Les Oligochètes Lumbriculidae quant à eux ont été significativement corrélés d'une part positivement à la conductivité électrique ($r = 0,179^*$), aux TDS ($r = 0,194^*$), à la salinité ($r = 0,167^*$), aux ions nitrites ($r = 0,172^*$) et nitrates ($r = 0,158^*$), aux éléments traces métalliques que sont le plomb, le cobalt, le bore et le silicium ($r = 0,156^*$, $r = 0,164^*$, $r = 0,200^*$ et $r = 0,208^*$ respectivement) et d'autre part négativement au baryum ($r = -0,250^{**}$). Les Oligochètes Naïdidae ont été significativement et positivement corrélés à l'ion nitrate ($r = 0,178^*$) et au chrome ($r = 0,206^{**}$) mais négativement au Baryum ($r = -0,154^*$). Les Oligochètes Tubificidae quant à eux ont été significativement et positivement corrélés à la DBO₅ ($r = 0,197^*$), mais négativement à la dureté calcique ($r = -0,165^*$), au cadmium ($r = -0,188^*$), au cuivre ($r = -0,165^*$) et fer ($r = -0,167^*$).

Les familles de Mollusques enregistrées sont aussi influencées par les variables abiotiques. En effet, les Lymnaeidae ont été significativement et négativement influencés par la profondeur du puits ($r = -0,368^{**}$), l'altitude ($r = -0,270^{**}$), la couche d'eau ($r = 0,205^{**}$), la température ($r = -0,193^*$) et positivement influencés par le pH ($r = 0,347^{**}$), la Conductivité électrique ($r = 0,187^*$), les TDS ($r = 0,175^*$), la salinité ($r = 0,185^*$), l'oxydabilité ($r = 0,202^{**}$), la couleur ($r = 0,199^*$), l'azote ammoniacal ($r = 0,163^*$), la DCO ($r = 0,285^{**}$) et les métaux tels que le cadmium, l'étain, le manganèse, le fer, le cobalt, le nickel, le bore et l'arsenic ($r = 0,173^*$, $r = 0,163^*$, $r = 0,195^*$, $r = 0,312^{**}$, $r = 0,176^*$, $r = 0,179^*$, $r = 0,192^*$, $r = 0,300^{**}$ respectivement).

Les Mollusques Physidae quant à eux ont été significativement et négativement corrélés avec la profondeur de l'eau ($r = -0,399^{**}$), l'altitude ($r = -0,287^{**}$), la couche d'eau ($r = -0,261^{**}$) et positivement corrélés au pH ($r = 0,424^{**}$), à la conductivité électrique ($r = 0,160^*$), aux TDS ($r = 0,168^*$), à la salinité ($r = 0,159^*$), aux teneurs en ions nitrites ($r = 0,206^{**}$), à la DCO ($r = 0,154^*$) et aux métaux tels que le baryum, le zinc, le cadmium, l'étain, le plomb, le manganèse et l'arsenic ($r = 0,181^*$, $r = 0,253^{**}$, $r = 0,210^{**}$, $r = 0,196^*$, $r = 0,235^{**}$, $r = 0,334^{**}$ et $r = 0,345^{**}$ respectivement).

Les Ostracodes Cyprididae et Cytheridae récoltés ont été corrélés aux paramètres abiotiques mesurés. La famille de Cyprididae a été significativement et négativement influencée par la profondeur du puits ($r = -0,257^{**}$), à la hauteur de la margelle ($r = -0,214^{**}$), à la température ($r = -0,202^{**}$) et à la dureté calcique ($r = -0,158^*$), mais positivement corrélée au pH ($r = 0,279^{**}$), au baryum ($r = 0,176^*$) et au manganèse ($r = 0,254^{**}$). La famille de Cytheridae quant à elle a été significativement et positivement influencée par le pH ($r = 0,207^{**}$), la conductivité électrique ($r = 0,203^{**}$), les TDS ($r = 0,204^{**}$) et la salinité ($r = 0,199^*$) et négativement influencée par le potassium ($r = -0,165^*$) et le nickel ($r = -0,163^*$).

L'espèce de Crustacés stygobies décrite, *Metastenasellus boutini* (famille de Stenasellidae), a été significativement et positivement influencée par la profondeur du puits ($r = 0,377^{**}$), l'altitude ($r = 0,384^{**}$), la hauteur de la margelle ($r = 0,275^{**}$), la saturation en oxygène dissous ($r = 0,227^{**}$) et le magnésium ($r = 0,192^*$). Cependant, cette espèce est très sensible à l'augmentation du pH ($r = -0,266^{**}$), de la conductivité électrique ($r = -0,290^{**}$), des TDS ($r = -0,284^{**}$), de la salinité ($r = -0,284^{**}$), de la teneur en CO₂ dissous ($r = -0,303^{**}$), des MES ($r = -0,191^*$), de la turbidité ($r = -0,191^*$), des teneurs en ions nitrites ($r = -0,331^{**}$), de l'azote ammoniacal ($r = -0,169^*$), et également sensible aux métaux tels que le potassium, le sodium, le zinc, le cadmium, le plomb, le polonium, le cuivre, le chrome, le manganèse, le fer, le cobalt, le nickel, le bore et l'antimoine ($r = -0,187^*$, $r = -0,160^*$, $r = -0,345^{**}$, $r = -0,216^{**}$, $r = -0,273^{**}$, $r = -0,242^{**}$, $r = -0,329^{**}$, $r = -0,319^{**}$, $r = -0,297^{**}$, $r = -0,335^{**}$, $r = -0,353^{**}$, $r = -0,298^{**}$, $r = -0,173^*$, $r = -0,213^{**}$, respectivement). Les Crustacés terrestres de la famille des Oniscidae n'ont pas été significativement corrélés aux différents paramètres abiotiques mesurés.

Les Copépodes Cyclopidae ont été significativement et positivement corrélés à l'élévation du pH ($r = 0,161^*$), de la couleur ($r = 0,198^*$), des MES ($r = 0,194^*$), du cadmium ($r = 0,164^*$), du plomb ($r = 0,198^*$) et de l'arsenic ($r = 0,157^*$), et négativement corrélés au magnésium ($r = -0,192^*$).

Les familles d'Odonates recensées ont été corrélées aux variables abiotiques. Les Libellulidae ont été significativement et négativement corrélés à la couche d'eau ($r = -0,154^*$), à la saturation en oxygène ($r = -0,163^*$), à la DBO₅ ($r = -0,199^*$) et positivement au polonium ($r = 0,162^*$). La famille de Gomphidae quant à elle a été significativement et négativement corrélée à l'altitude ($r = -0,69^*$), tandis que celle des Cordulidae a été positivement corrélée aux teneurs en ions nitrites ($r = 0,177^*$) et à l'antimoine ($r = 0,155^*$).

Les Diptères récoltés durant cette étude ont également été corrélés avec les paramètres environnementaux. Les Chironomes ont été significativement et négativement corrélés avec la profondeur de l'eau ($r = -0,274^{**}$), l'altitude ($r = -0,161^*$), la hauteur de la margelle ($r = -0,208^{**}$), la température ($r = -0,195^*$), les teneurs en ions orthophosphates ($r = -0,181^*$) et le magnésium ($r = -0,179^*$), et positivement corrélés avec l'alcalinité ($r = 0,197^*$), les ions nitrites ($r = 0,156^*$), la DCO ($r = 0,241^{**}$), le cuivre ($r = 0,196^*$), le chrome ($r = 0,159^*$), le fer ($r = 0,187^*$) et l'arsenic ($r = 0,195^*$). Les nymphes de Psychodidae ont été significativement corrélées d'une part positivement à la conductivité électrique ($r = 0,199^*$), aux TDS ($r = 0,204^{**}$), à la salinité ($r = 0,192^*$), au cuivre ($r = 0,167^*$), au manganèse ($r = 0,154^*$) et au bore ($r = 0,175^*$) et d'autre part négativement corrélées aux teneurs en orthophosphates ($r = -0,170^*$) et au baryum ($r = -0,161^*$). La famille de Ceratopogonidae a été positivement corrélée aux paramètres tels que la conductivité électrique ($r = 0,318^{**}$), les TDS ($r = 0,325^{**}$), la salinité ($r = 0,318^{**}$), les ions nitrites ($r = 0,230^{**}$) et nitrates ($r = 0,189^*$), le zinc et le cuivre ($r = 0,196^*$, $r = 0,269^{**}$ respectivement). Celle des Culicidae a été significativement et positivement corrélée au baryum ($r = 0,156^*$) et négativement au calcium ($r = -0,160^*$). Quant à la famille de Stratiomyidae, elle a été significativement et positivement corrélée au dioxyde de carbone dissous ($r = 0,198^*$), aux ions nitrates ($r = 0,182^*$), potassium ($r = 0,180^*$), sodium ($r = 0,224^{**}$) et au zinc et cadmium ($r = 0,206^{**}$ et $r = 0,204^{**}$ respectivement).

Plusieurs Coléoptères recensés dans cette étude ont présenté des corrélations significatives et positives avec certaines variables abiotiques mesurées. La famille des Elmidae a été corrélée aux MES ($r = 0,163^*$), à l'azote ammoniacal ($r = 0,159^*$) et au manganèse ($r = 0,154^*$). Celle des Dytiscidae a été corrélée à la dureté calcique ($r = 0,176^*$) et au manganèse ($r = 0,154^*$), tandis que la famille des Hydrophilidae a été corrélée au bore ($r = 0,163^*$). Les familles des Dryopidae et des Hygrobiidae n'ont présenté aucune corrélation significativement avec les variables mesurées.

III.1.3.2. Modélisation Linéaire basée sur la distance

La distLm (Distance based linear models), réalisée à partir des données abiotiques et biotiques enregistrées dans les différents sites durant la période d'étude, a permis de montrer que les facteurs abiotiques principaux ($p < 0,01$) qui contrôlent la distribution de la faune sont l'altitude, le pH, le CO₂ dissous, la turbidité, le magnésium (**Tableau XXVIII**). Ensuite, dans une moindre mesure ($p < 0,05$), la température, l'alcalinité, l'oxydabilité, les nitrites, les nitrates, l'azote ammoniacal et la DCO expliquent également la distribution de la faune aquatique souterraine enregistrée. D'autres paramètres tels que la conductivité électrique, les orthophosphates, la DBO₅, le sodium, le potassium, le calcium et les Eléments Traces Métalliques (ETM) n'ont pas été significatifs ($p > 0,05$).

Tableau XXVIII : Résultats de la distLm réalisée à partir des données abiotiques et biotiques enregistrées dans les différents sites durant la période d'étude.

<i>MARGINAL TESTS</i>				
Variable	SS(trace)	Pseudo-F	P	Prop.
Alt (m)	21525	7.0844	0.001**	8.6306E-2
Température (°C)	6144.2	1.8944	0.053*	2.4636E-2
pH (UC)	12311	3.8946	0.001**	4.9364E-2
Cond Elec (µS/Cm)	3690.3	1.1264	0.326	1.4797E-2
CO2 dissous (mg/L)	9157.1	2.8587	0.005**	3.6717E-2
Alcalinité (mg/L)	7214	2.2341	0.014*	2.8926E-2
Oxydabilité	6322	1.9506	0.041*	2.5349E-2
Turbidité (FTU)	7875.7	2.4456	0.008**	3.1579E-2
Nitrites (mg/L de NO ₂ ⁻)	6182.5	1.9065	0.03*	2.479E-2
Nitrates (mg/L de NO ₃ ⁻)	6612.9	2.0428	0.042*	2.6515E-2
Orthophos (mg/L PO ₄ ³⁻)	3656.4	1.1159	0.361	1.4661E-2
NH ₄ ⁺ (mg/L)	7354.7	2.279	0.015*	2.949E-2
DCO (mg/L)	6684.2	2.0655	0.036*	2.6801E-2
DBO5 (mg/L)	2162.8	0.65608	0.767	8.6719E-3
K(mg/L)	3766.6	1.1501	0.33	1.5103E-2
Na (mg/L)	3247.6	0.98952	0.452	1.3022E-2
Mg (mg/L)	10036	3.1446	0.003**	4.024E-2
Ca (mg/L)	5216.4	1.6022	0.116	2.0916E-2
ETM (mg/L)	5006.8	1.5365	0.12	2.0075E-2

** . Corrélation significative au seuil 0.01; * . Corrélation significative au seuil 0.05.

III.1.3.3. Analyse de redondance basée sur la distance

L'analyse de redondance basée sur la distance (dbRDA, Distance-based redundancy analysis) réalisée sur les données abiotiques et la faune aquatique souterraine enregistrée explique 51,5% de la variation totale de la chimie de l'eau et 17,7% de la variation totale de la faune (Figure 42). Ceci montre que les interactions entre les facteurs environnementaux et la stygofaune recensée sont assez faibles, car moins de 20% de la faune est expliquée par les facteurs abiotiques.

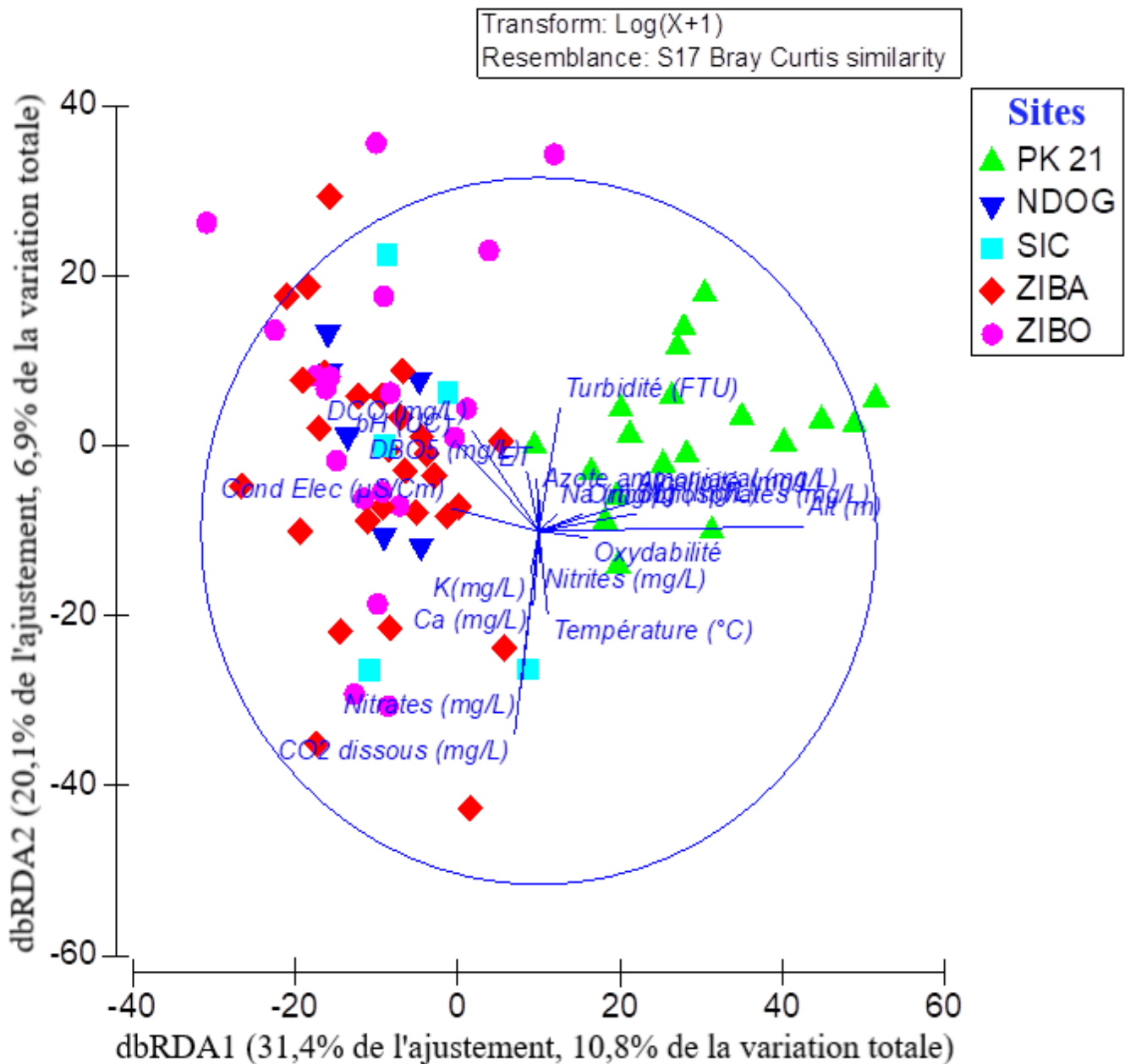


Figure 42 : Résultats de la dbRDA réalisée à partir des données abiotiques et biotiques enregistrées dans les différents sites durant la période de l'étude. PK 21, NDOG, SIC, ZIBA et ZIBO désignent les sites d'étude.

III.2. Discussion

La qualité de l'eau d'un puits et la biodiversité qu'elle héberge sont influencés par trois facteurs principaux à savoir le climat, les caractéristiques de l'habitat, et la nature du site considéré (Musa *et al.*, 2014).

III.2.1. Physicochimie des eaux souterraines de la ville de Douala

Au cours de la présente étude, la qualité physicochimique des eaux souterraines de Douala a varié significativement entre la zone urbaine industrialisée et la zone périurbaine. De même, des variations saisonnières significatives ont été observées pour certains paramètres aussi bien en milieu urbain qu'en milieu périurbain.

Le pH des eaux souterraines de Douala est acide ; qu'on soit dans la zone périurbaine ou dans les zones urbaines industrialisées. Cette acidité pourrait être attribuée au pH du substrat car, d'après Din Ndongo (2001), le socle de Douala est constitué de sols ferrallitiques à texture sableuse à sablo-argileuse au pH acide. A ce sujet, Rodier *et al.* (2009) soulignent que le pH des eaux naturelles est lié à la nature des terrains traversés. Cependant, on note une légère augmentation du pH dans les puits industriels, notamment à ZIBA et ZIBO. Ceci peut s'expliquer par les rejets industriels qui apportent des substances chimiques basiques qui participent à élever le pH de l'eau. Ces valeurs du pH se rapprochent de celles obtenues par Nana Nkemegni (2015) dans les hauts plateaux Bamoun (5,4-6,6 UC) et de celles obtenues (4,28-5,65 UC) par Chinche (2021) dans les eaux souterraines du Fako (région du Sud-Ouest).

La conductivité électrique, les Solides Totaux Dissous (TDS) et la salinité ont été relativement élevés dans l'ensemble des sites étudiés. Cependant, les eaux souterraines des zones urbaines industrialisées présentent les plus fortes valeurs en ces paramètres. Ceci pourrait s'expliquer par les intrusions salines dues à la proximité de ces sites avec la mer. En plus, les fortes valeurs de conductivité et des TDS enregistrées s'expliqueraient par les apports permanents et diffus d'eaux usées domestiques, communales et industrielles fortement minéralisées. A ce propos, Montgomery (1992) souligne que les effluents d'industries chimiques sont très souvent chargés en polluants minéraux divers (organiques, sulfurés, phosphatés, silicatés, métalliques, etc.). La mesure de la conductivité permet d'évaluer rapidement mais très approximativement la minéralisation globale de l'eau et d'en suivre l'évolution (Rodier *et al.*, 2009). A ce titre, les eaux souterraines de la zone périurbaine de PK 21 indiquent une minéralisation moyenne accentuée ($333 \mu\text{S}/\text{cm} < \text{conductivité} < 666 \mu\text{S}/\text{cm}$), celles de Ndogbong et de Cité SIC témoignent d'une minéralisation importante ($666 \mu\text{S}/\text{cm} <$

conductivité < 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), tandis dit que la minéralisation est élevée (conductivité > 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) dans les eaux souterraines des zones industrielles (ZIBA et ZIBO).

La saturation moyenne en oxygène dissous a été plus élevée dans la zone périurbaine de PK 21 et les plus faibles teneurs ont été enregistrées dans les sites urbains industrialisés (Nogbong, Cité SIC, ZIBA et ZIBO). L'oxygénation relativement élevée ($67,13 \pm 9,52\%$) des eaux de la zone périurbaine pourrait s'expliquer par les températures relativement faibles dans ces eaux. Inversement, les plus faibles teneurs en oxygène dissous dans les zones urbaines s'expliqueraient par les températures relativement élevées et la prolifération des microorganismes dans ces eaux. Selon Rodier *et al.* (2009), quand la température s'élève, la teneur en oxygène diminue en raison de sa plus faible solubilité, mais aussi à cause de la consommation accrue par les êtres vivants et les bactéries qui se multiplient.

Les eaux souterraines prospectées ont présenté des faibles teneurs en azote minéral (NH_4^+ , NO_2^- et NO_3^-) et les teneurs moyennes enregistrées sont restées largement inférieures aux normes de l'OMS (2011) qui recommandent pour les eaux de consommation 0,2mg/L, 3mg/L et 50mg/L respectivement. Cependant, les teneurs en ces composés azotés ont été plus élevés dans les sites urbains industrialisés. Les teneurs élevées en azote ammoniacal dans ces sites s'expliqueraient par la décomposition incomplète de la matière organique relativement à une faible oxygénation. Afonso (1992) souligne que la teneur élevée en azote ammoniacal est liée à une importante charge organique de l'eau souterraine dont la dégradation engendre des composés azotés. Tandis que les teneurs élevées en nitrates dans ces sites urbains industrialisés s'expliqueraient par les rejets urbains et industriels. Rodier *et al.* (2009) précisent à ce sujet que les rejets des collectivités et occasionnellement de certaines industries peuvent aussi concourir à l'enrichissement en nitrates des eaux. Les teneurs en nitrites n'ont pas varié avec la saison, alors que celles de nitrates et de l'azote ammoniacal ont été significativement différentes d'une saison à l'autre et les plus fortes valeurs en ces deux paramètres ont été enregistrées en saison sèche. Ces résultats pourraient s'expliquer par la concentration de ces ions durant la saison sèche. En effet, durant la période d'étude, la couche d'eau dans les différents puits prospectés a diminué considérablement pendant la saison sèche, ce qui a participé à concentrer ces ions dans l'eau.

Les valeurs de la température dans les eaux souterraines prospectées ont été significativement différentes d'une saison à l'autre ; ces eaux étant plus chaudes durant la saison sèche. Ces résultats s'expliqueraient par l'élévation de la température ambiante pendant la saison sèche. En effet, les eaux souterraines sont entièrement dépendantes des variations de la

température ambiante (Ait Boughrou, 2007 ; Morvan, 2013). Cependant, les plus fortes valeurs de la température ont été obtenues dans les zones urbaines industrialisées. Ces résultats s'expliquent d'une part par la faible profondeur des puits dans ces zones. A ce propos, Ait Boughrou (2007) mentionne que la température des eaux de puits diminue avec la profondeur. Ces plus fortes valeurs de la température enregistrées dans ces zones pourraient d'autre part, s'expliquer par l'urbanisation et l'industrialisation. Selon Jain (2012) et Porse (2013), l'occupation anarchique des sols, la surpopulation et l'industrialisation sont des facteurs qui interfèrent pour augmenter la température ambiante ; et par conséquent celle des eaux souterraines, entièrement dépendantes.

Les concentrations moyennes en CO₂ dissous des eaux souterraines de la ville de Douala sont relativement faibles (< 50 mg/L). En raison d'une forte limitation en carbone, les écosystèmes souterrains se placent en position extrême le long d'un gradient de productivité (Chelius *et al.*, 2009). De ce fait, le carbone présent dans les eaux souterraines des sites prospectés serait essentiellement attribuable à la dégradation des particules organiques par les bactéries (Moucherou *et al.*, 2011), et à la respiration par les invertébrés souterrains. Ces faibles valeurs de CO₂ (8,3-38,4mg/L) ont également été obtenues par Nana Nkemegni (2017) dans le haut plateau Bamoun.

L'alcalinité d'une eau correspond à la présence d'hydrogencarbonates (HCO₃⁻), de carbonates (CO₃²⁻), d'ions hydroxydes (OH⁻) et d'une façon plus limitée, aux ions silicates (HSiO₃²⁻), phosphates (PO₄³⁻) ou encore aux espèces moléculaires des acides faibles (Rodier *et al.*, 2009). Durant cette étude, les valeurs moyennes de l'alcalinité ont été faibles sur l'ensemble des sites prospectés. Cette faible alcalinité des eaux souterraines de la ville de Douala serait essentiellement due à la nature acide du socle. A ce sujet, Mary (1999) souligne que la nature du socle influence la concentration en ions alcalins. En plus, aucune différence significative n'a été obtenue entre les valeurs enregistrées de l'alcalinité dans les différents sites. Ceci s'explique par le fait que les faibles valeurs de l'alcalinité ne sont pas liées à l'anthropisation ou l'industrialisation, mais plutôt à la nature acide des sols de la région.

Les teneurs moyennes en orthophosphates enregistrées ont été supérieures à la valeur de référence (0,5mg/L) recommandée par l'OMS (2011). Ces teneurs ont été les plus élevées durant la saison sèche et ceci pourrait s'expliquer par la concentration de ces ions par la faible quantité d'eau dans les puits pendant cette période. Globalement, les fortes valeurs en orthophosphates observées s'expliqueraient selon Rodier *et al.* (2009) par leur présence naturelle ou anthropique. Leur présence naturelle dans les eaux est liée aux caractéristiques des

terrains traversés et à la décomposition de la matière organique. Dans les eaux de puits, ces ions peuvent avoir pour origine une infiltration en provenance de fosses d'aisance ou de dépôts de fumier. Toujours selon Rodier et al. (2009), les nappes peuvent également être contaminées par des rejets industriels (industries agro-alimentaires, ateliers de traitement de surface, laveries) et domestiques ou par le lessivage des terres cultivées renfermant des engrais phosphatés ou traités par certains pesticides.

La DCO et la DBO₅ ont varié très significativement d'une saison à l'autre. La Demande Chimique en Oxygène (DCO) représente la quantité d'oxygène consommée, en mg/l, par les matières oxydables chimiquement. Elle est représentative de la majeure partie des composés organiques mais également de sels minéraux oxydables (sulfures, chlorures,...) (Hassoune *et al.*, 2006 ; Rodier *et al.*, 2009). Bien que les plus fortes valeurs aient été obtenues durant la saison des pluies dans tous les sites, les valeurs moyennes de DCO pour toutes les eaux des puits étudiés dépassent la valeur de 80 mg d'O₂/L fixée par l'OMS (2011). Les valeurs moyennes de la Demande Biochimique en Oxygène pendant 5 jours (DBO₅) ont été plus élevées durant la saison sèche et sont globalement supérieures à la valeur de référence (5 mg/L) fixée par l'OMS (2011) pour les eaux naturelles.

Les fortes valeurs de DCO et de DBO₅ témoignent d'une pollution organique (modérée pour la zone périurbaine et accentuée pour les puits industriels) des eaux des puits prospectés. Cette pollution organique pourrait s'expliquer d'une part par le mauvais état de protection de certains ces puits (absence de margelle et couvercle, surtout pour les puits urbains et urbains industrialisés). A ce sujet, Boutin (1993) souligne que le mauvais état de protection des puits favorise la pénétration des eaux de ruissèlement le plus souvent chargées en débris animaux et végétaux. Cette pollution organique s'expliquerait d'autre part, par les rejets urbains et industriels riches en matières organiques.

Les valeurs moyennes relativement faibles de la couleur ($46,35 \pm 56,01$ Pt.Co), des MES ($8,40 \pm 8,44$ mg/L) et de la turbidité ($7,08 \pm 8,45$ FTU) observées dans la zone périurbaine de PK 21 seraient dues à la charge organique modérée de ces eaux. Néanmoins, les plus fortes valeurs ont été enregistrées durant la saison sèche et s'expliqueraient par la faible quantité d'eau et l'utilisation régulière des puits qui remue l'eau et remet en suspension les particules, augmentant ainsi ces paramètres de l'eau. Cependant, les valeurs de ces paramètres ont été très élevées (variant de 59 à 964 Pt-Co, 29 à 80 mg/L et de 22 à 82 FTU respectivement) dans les sites urbains industrialisés. Ces fortes valeurs s'expliqueraient par la forte pollution organique enregistrée dans ces eaux en relation avec les rejets urbains et industriels parvenant à ces nappes

souterraines. Les eaux souterraines de ZIBO ont été particulièrement colorées. Cette forte coloration pourrait être liée à la richesse de ces eaux en hydroxydes de fer. A ce propos, Rodier *et al.* (2009) soulignent que les hydroxydes de fer peuvent également dans les eaux souterraines être responsables de la couleur observée.

De tous les éléments traces métalliques et d'autres métaux mesurés dans les eaux souterraines de la ville de Douala, les teneurs en zinc et en cuivre ont été inférieures aux valeurs de référence pour une eau de consommation humaine (2 mg/L et 3mg/L respectivement). Le site périurbain de PK 21, en-dehors du cadmium, de l'arsenic et du baryum qui présentent des valeurs moyennes légèrement supérieures aux valeurs de référence, est le site qui présente les plus faibles teneurs des différents métaux mesurés, aussi bien dans l'eau que dans les sédiments. Ces faibles valeurs en ces métaux témoignent du caractère peu anthropisé et non industrialisé de cette zone. Cependant, les sites urbains industrialisés présentent les teneurs moyennes les plus élevées et parfois largement au-dessus des valeurs de référence. Ces fortes teneurs en éléments traces métalliques s'expliqueraient par l'infiltration des rejets industriels et domestiques, les ruissellements orageux urbains, le lessivage de métaux provenant de décharges d'ordures ménagères et de résidus solides (Biney *et al.*, 1994).

Les teneurs de ces différents métaux mesurés ont été relativement plus élevées dans les sédiments que dans la colonne d'eau des sites de PK 21 et de ZIBA contrairement aux autres sites prospectés durant cette étude (Ndogbong, Cité SIC et ZIBO). Les fortes teneurs retrouvées dans la colonne d'eau dans ces derniers sites s'expliqueraient par les profondeurs et les colonnes d'eau relativement faibles des puits de ces zones, des facteurs qui favoriseraient la remise en suspension des métaux lors de l'utilisation par la population.

La typologie abiotique réalisée par l'Analyse en Composantes Principales (ACP), la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et les résultats de la Permanova ont permis de conclure qu'il y'a un gradient de pollution des différents sites étudiés. Ces derniers peuvent à cet effet, être classés en trois (03) groupes :

- Le groupe de PK 21 (site témoin) caractérisé par des eaux bien oxygénées, faibles en nutriments et en ETM ;
- Le groupe de Ndogbong, Cité SIC et ZIBA caractérisé par des eaux moyennement riches en ETM et en nutriments ;
- Le groupe de ZIBO aux eaux très faiblement oxygénées, très riches en nutriments et en ETM.

III.2.2. Faune aquatique souterraine de Douala

III.2.2.1. Dynamique de la richesse taxonomique de la stygofaune

Au vu des données biologiques obtenues au cours de cette étude, nous pouvons affirmer que la richesse taxonomique globale des communautés aquatiques souterraines (30 taxa ou familles pour 162 échantillons) observée pour l'ensemble des cinq (05) sites de la ville de Douala est vraisemblablement faible comparée à celle obtenue par Chinche *et al.* (2019) dans la ville de Tiko (29 taxa pour 40 échantillons) et à celle obtenue par Nana Nkemegni (2017) dans les hauts plateaux Bamoun (58 taxa pour 216 échantillons). Ceci serait la conséquence de la forte anthropisation de la ville de Douala. Cette anthropisation, se traduisant par des rejets urbains et industriels sans cesse croissants, impacte négativement le milieu aquatique souterrain et expliquerait la baisse progressive de la richesse taxonomique. Ce constat justifierait également la plus grande richesse taxonomique obtenue quelques années plutôt par Tuekam Kayo (2013) dans certains sites de la ville de Douala (43 taxa pour 144 échantillons récoltés). Cette plus importante richesse taxonomique obtenue par Tuekam Kayo (2013) dans la même ville pourrait également être attribuée d'une part à la fréquence d'échantillonnage (mensuelle) et d'autre part à l'effort et aux stratégies d'échantillonnage (filet phréatobiologique, pièges appâtés). En effet, Maurice (2009) a démontré que des échantillonnages répétés avec une diversification des procédés d'échantillonnage sont nécessaires pour maximiser les abondances et la diversité d'une faune.

De façon globale, on note une très grande disparité de la richesse taxonomique dans les cinq sites étudiés. En effet, ce sont 15 taxa (familles) différents qui ont été inventoriés dans le site périurbain de PK 21, 13 dans le site de Ndogbong, 16 à Cité SIC, 17 et 25 dans les sites industriels de Bassa (ZIBA) et de Bonabéri (ZIBO) respectivement. La faible richesse taxonomique obtenue dans la zone périurbaine pourrait être tributaire du traitement de l'eau par les populations riveraines. En effet, du fait de l'absence d'un réseau d'adduction en eau potable dans cette zone, les populations traitent les eaux souterraines pour leur consommation, ceci par ajout de l'eau de Javel ou de sel (fréquence non déterminée). Ces substances ajoutées dans ces eaux participent à dégrader la faune qu'elles hébergent. Cette faible faune obtenue dans ce site témoin pourrait également s'expliquer par la pauvreté naturelle de l'aquifère dans cette zone, qui contiendrait une masse d'eau différente de celle des autres zones prospectées.

La zone périurbaine de PK 21 héberge une faune stygobie, absente dans les autres sites étudiés. Cette présence unique des représentants stygobies de la famille de Stenasellidae (*Metastenasellus boutini*) témoigne d'une meilleure qualité de l'eau dans cette zone. Ces organismes ont été récoltés dans des puits avec un état de protection acceptable, des charges en

éléments dissous réduites, une bonne oxygénation de l'eau et avec une bonne épaisseur d'eau. Ces espèces sont indicatrices de la qualité des eaux des stations considérées et reflètent la bonne qualité physicochimique du milieu où elles se trouvent par leur simple présence (Ait Boughrou, 2007). Ces observations avaient déjà été faites dans des études antérieures qui ont souligné que les invertébrés aquatiques souterrains sont des descripteurs de la structure et du fonctionnement des aquifères (Creuzé Des Châtelliers et Dole-Olivier, 1991) et de bons indicateurs de la qualité des eaux (Boutin, 1984 ; Boulanouar, 1995 ; Boulal *et al.*, 1997 ; Boulal *et al.*, 2009 ; Humphrey, 2009; Steube *et al.*, 2009; Stein *et al.*, 2010).

Dans les sites urbains et urbains industrialisés, on note l'absence totale des représentants stygobies durant toute la période de l'étude. Ceci s'expliquerait d'une part par la forte densité de la population impliquant des rejets urbains importants et d'autre part par une forte industrialisation induisant d'années en années des rejets industriels importants qui, du fait de la communication avec le milieu souterrain (Zébazé Togouet *et al.*, 2009), participent à dégrader ce dernier, impactant ainsi la faune qui s'y trouve. Ces observations sont en étroite relation avec la composition faunistique de ces zones. En effet, la faune de l'ensemble de ces sites est largement dominée par les taxons qui affectionnent les milieux pollués. Les Diptères Chironomidae, les Ostracodes Cyprididae et les Oligochètes Lumbriculidae représentent 96% de la faune de Ndogbong et 43% de celle de Cité SIC. La faune de ZIBA est composée à 84% de ces familles suscitées auxquelles il faut ajouter la famille de Cyclopidae. Celle de ZIBO est fortement dominée (91%) par les familles de Lumbriculidae, Chironomidae, Cyprididae, Cyclopidae, Gordiacea et Physidae. La forte domination de la faune de ces sites urbains et urbains industrialisés par des taxons ayant des nombreux représentants reconnus saprophytes (Tachet *et al.*, 2010) témoigne de la dégradation de ces eaux souterraines. Par ailleurs, les fortes abondances de Mollusques (Lymnaeidae et Physidae) hôtes intermédiaires de Trématodes et de Schistosomes dans les sites industriels (ZIBA et ZIBO), constituent un risque potentiel d'émergence des helminthiases dans ces zones.

L'analyse du peuplement aquatique souterrain de la ville de Douala montre que cette faune est globalement composée d'un mélange d'organismes stygoxènes, stygophiles et stygobies, avec une domination des espèces épigées. Ces observations sont similaires à celles de Zébazé Togouet *et al.* (2009 ; 2011) et Tuekam Kayo (2013), concernant les eaux souterraines du Centre et Littoral camerounais. Ces observations ont également été faites par Nana Nkemegni (2017) dans les eaux souterraines des Hauts Plateaux Bamoun et par Chinche (2021) dans la région du sud-ouest (département du Fako).

III.2.2.2. Clé dichotomique nouvelle du genre *Metastenasellus*

La présente clé d'identification concerne les mâles des neuf espèces actuellement connues du genre *Metastenasellus* : *M. leleupi* (Chappuis, 1951) ; *M. congolensis* (Chappuis, 1951) ; *M. dartivellei* (Chappuis, 1952) ; *M. wikkiensis* (Lincoln, 1972) ; *M. powelli* (Magniez, 1979) ; *M. tarrissei* (Magniez, 1979) ; *M. leysi* (Magniez, 1986) ; *M. camerounensis* (Zebaze Togouet, Boulanouar, Njiné & Boutin), 2013, *M. boutini* (Pountougnigni, Piscart & Zebaze) (présente étude).

Comme la clé proposée par Zébazé *et al.* (2013), la présente clé est largement basée sur le deuxième pléopode mâle. Cependant, la taille intermédiaire de *M. boutini* n'a pas permis de simplement mettre à jour la clé proposée par Zebaze *et al.* (2013). Par conséquent, la nouvelle clé a été largement reconstruite, comme suit :

- 1** Pléopode 2, partie distale du canal spermatique faisant clairement saillie de la partie principale du deuxième article de l'endopodite (Figures 43A-E).....**2**
- Pléopode 2, partie distale du canal spermatique légèrement en saillie ou entièrement à l'intérieur du second article de l'endopodite (Figures 43A-E) deuxième article de l'endopodite (Figures 43 F-I).....**6**
- 2** Pléopode 2, partie externe du canal spermatique faisant fortement saillie ($\geq 50\%$) à l'extérieur du deuxième article de l'endopodite (Figures 43A-B).....**3**
- Pléopode 2, partie externe du canal spermatique faisant légèrement saillie ($\approx 20\%$) du deuxième article de l'endopodite (Figures 43C-E).....**4**
- 3** Pléopode 2, deuxième article de l'endopodite subrectangulaire, partie externe du canal spermatique égale à la moitié de la longueur du deuxième article de l'endopodite avec une rangée de dents chitineuses le long des deux dernières spires, deuxième article de l'exopodite avec 4 soies marginales et subterminales mais sans seta terminal ; longueur totale du corps > 10 mm ; (Figure 43B).....***M. camerounensis* [Yaoundé, Cameroun]**
- Pléopode 2, second article de l'endopodite conique, partie externe du canal spermatique de même longueur que le second article avec une rangée de dents chitineuse seulement à l'apex, deuxième article de l'exopodite avec 2 ou 3 soies avec une soie terminale à l'apex; longueur totale du corps < 8 mm (Figure 42A).....
.....***M. leleupi* [Province de Kinshasa, République démocratique du Congo]**
- 4** Pléopode 2, premier segment de l'endopodite clairement délimité, deuxième article de l'exopodite avec 6 à 8 soies (Figures 43D-E) ; flagelle de l'antenne 2 avec plus de 45 articles.....**5**

- Pléopode 2, premier segment de l'endopodite non clairement délimité, deuxième article de l'exopodite avec 5 soies (Fig. 43C) ; flagelle de l'antenne 2 avec pas plus de 35 articles.....

***M. dartivellei* [province de l'Équateur, nord-ouest de la République démocratique du Congo].**

5 Protopodite du pléopode 2 plus long que large (Figure 43D) ; marge du protopodite du pléopode 1 droit; flagelle de l'antenne 1 avec moins de 10 articles; longueur totale du corps < 8 mm..... ***M. powelli* [Port Harcourt, sud-est du Nigéria]**

- Protopodite du pléopode 2 plus long que large (Figure 43E) ; marge du protopodite du pléopode 1 convexe ou concave ; flagelle de l'antenne 1 avec au moins 18 articles; longueur totale du corps > 10 mm..... ***M. congolensis* [Province centrale du Congo, est de la République démocratique du Congo]**

6 Pléonites 1 et 2 aussi longs que le péronite 7 ; flagelle de l'antenne 1 avec moins de 8 articles ; flagelle de l'antenne 2 avec moins de 25 articles ; longueur totale du corps ≤ 5mm.....**7**

- Pléonites 1 et 2 aussi longs que 50% du péronite 7 ; flagelle de l'antenne 1 avec 8 articles ; flagelle de l'antenne 2 avec plus de 25 articles ; longueur totale du corps ≥ 8mm.....**8**

7 Pléopodes 2 exopodite plus large que l'endopodite ; exopodite et endopodite non clairement séparés (Figure 43G) ; flagelle de l'antenne 1 avec 2 articles ; flagelle de l'antenne 2 avec 13 articles ; longueur totale du corps ≤ 3,5 mm.....
.....***M. leysi* [Province de Naâma, nord-est de l'Algérie]**

- Pléopode 2 endopodite plus large que l'exopodite ; exopodite et endopodite bien séparés (Figure 43I) ; flagelle de l'antenne 1 avec 7 articles ; flagelle de l'antenne 2 avec 25 articles ; longueur totale du corps ≅ 5 mm.....
.....***M. tarrissei* [Région des lacs, centre de la Côte d'Ivoire]**

8 Protopodite du pléopode 2 avec un lobe externe, deuxième article sans soies terminales (Figure 43F); uropode jamais aussi long que 50% du pléotelson.....
.....***M. boutini* [Douala, sud-ouest du Cameroun]**

- Pléopodes 2 : protopodite sans lobe externe, deuxième article avec une soie terminale (Figure 43H); uropode deux fois plus long que le pléotelson pour les mâles les plus longs.....
.....***M. wikkiensis* [État du Plateau, nord-est du Nigeria]**

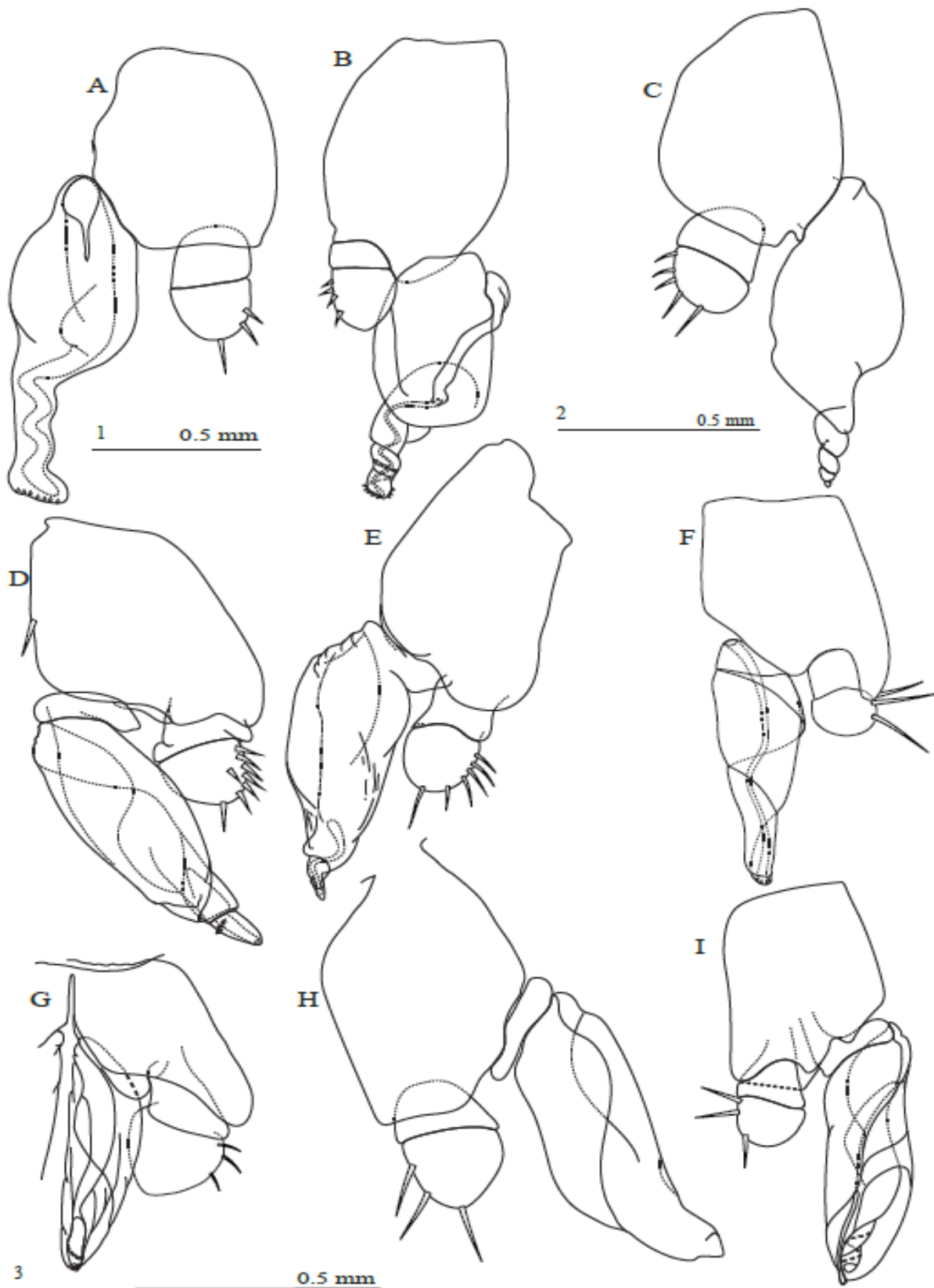


Figure 43 : Pléopodes 2 mâles des espèces de *Metastenasellus* (A) *M. leleupi* (échelle 1) (B) *M. camerounensis* (échelle 1) (C) *M. dartivellei* (échelle 2) (D) *M. powelli* (échelle 3) (E) *M. congolensis* (échelle 1) (F) *M. boutini* (échelle 2) (G) *M. leysi* (échelle 3) (H) *M. wikkiensis* (échelle 2) (I) *M. tarrissei* (échelle 3).

III.2.3. Influence des paramètres environnementaux sur la distribution de la stygofaune

La perte de l'intégrité écologique d'une eau souterraine a un impact sur la zoocénose phréatique ; elle peut aller jusqu'à l'extinction des espèces les plus sensibles (Boulal, 2002 ; Ait Boughrouss *et al.*, 2007 ; Merzoug *et al.*, 2011 ; GIECC, 2014).

Les paramètres hydromorphologiques (profondeur et hauteur de la margelle du puits, couche d'eau) ont été corrélés à la faune étudiée. Ces observations ont également été faites par Nana Nkemegni *et al.* (2015). Ces auteurs signalent que la faune d'un puits est influencée par le niveau de protection, les caractéristiques morphométriques et hydrologiques du puits. En effet, les familles de Lymnaeidae, Physidae, Cyprididae et Chironomidae proliféreraient dans les eaux de puits de faible profondeur. De plus, une margelle haute serait défavorable au développement des Cyprididae et Chironomidae. L'augmentation de l'épaisseur de la couche d'eau quant à elle ne serait pas favorable à la prolifération des Lymnaeidae, des Physidae et des Libellulidae. Ces taxons, ayant des nombreux représentants saprophiles (Tachet *et al.*, 2010) prolifèrent dans les puits de faible profondeur, car plus le toit d'un puits est proche de la surface, plus il est sujette à des nombreuses pollutions (Aït Boughrouss *et al.*, 2007). En plus, des corrélations très significatives et positives ($p < 0,01$) ont été trouvées entre ces différentes familles et les paramètres abiotiques tels que la conductivité électrique, les TDS, la salinité, la couleur, les MES, l'oxydabilité et la turbidité. Ces résultats traduiraient le fait que ces différents taxons affectionnent les eaux polluées.

La famille stygobie récoltée (Stenasellidae) proliférerait dans les puits profonds avec des margelles hautes et se développerait mieux dans les eaux bien oxygénées. Des corrélations significatives et négatives ont également été trouvées entre ce taxon et les paramètres tels que le pH, la conductivité électrique, la salinité, les STD, le CO₂ dissous, les MES, la turbidité, les nitrites, l'azote ammoniacal. En plus, ce taxon n'affectionnerait pas les eaux riches en métaux lourds et métalloïdes. Ces résultats réconfortent le fait que les taxons stygobies sont des bons indicateurs de la bonne qualité des eaux souterraines (Boutin, 1984 ; Boulanouar, 1995 ; Boulal *et al.*, 1997 ; Boulal *et al.*, 2009 ; Humphrey, 2009 ; Steube *et al.*, 2009 ; Stein *et al.*, 2010).

L'altitude a été significativement corrélée à certains taxons récoltés. En effet, les Gomphidae, Lymnaeidae, Physidae et Chironomidae prolifèrent dans les eaux de basse altitude, tandis que la famille stygobie de Stenasellidae affectionnerait plutôt les eaux souterraines de haute altitude. Ceci s'expliquerait par le fait que l'altitude est l'un des facteurs qui explique le mieux la distribution de la faune souterraine (Chinche, 2021). Cependant, dans

cette étude, il a été noté des corrélations significatives et positives entre l'altitude et la faune stygobie. Ce qui est contraire aux observations de Chinche (2021) qui avait plutôt obtenu des corrélations significatives et négatives entre l'altitude et l'abondance des stygobies.

Les résultats de la distLM (Distance based linear models) et de la dbRDA (Distance-based redundancy analysis) ont permis de ressortir les paramètres abiotiques qui expliquent le mieux la distribution de la stygofaune obtenue. Il ressort de ces analyses que l'altitude, le pH, le CO₂ dissous, la turbidité et le magnésium sont les facteurs abiotiques principaux qui influencent la faune aquatique souterraine de Douala. A côté de ceux suscités, d'autres paramètres environnementaux tels que la température, l'alcalinité, l'oxydabilité, les nutriments (nitrites, nitrates et azote ammoniacal) et la DCO influencent aussi la distribution de cette faune, mais en moindre mesure. Les paramètres tels que la conductivité électrique, les orthophosphates, la DBO₅, le sodium, le potassium, le calcium et les ETM (éléments traces métalliques) n'influencent pas significativement la stygofaune. Cependant, la dbRDA fait ressortir le fait que seulement 51,5% de la variation totale des variables environnementales explique 17,7% de la variation totale de la faune enregistrée. Ces résultats permettent ainsi de comprendre que l'effet de la chimie des eaux souterraines sur la faune de Douala est très faible, car les paramètres abiotiques évalués n'expliquent que moins de 20% de la faune souterraine de cette zone.

**CONCLUSION,
RECOMMANDATIONS ET
PERSPECTIVES**

La diversité, la structure et la typologie des peuplements aquatiques souterrains en relation avec l'urbanisation et l'industrialisation ont été étudiées dans cinq (5) sites en milieu périurbain et urbain à Douala. Au total, quarante et un (41) puits ont été étudiés dans les cinq sites.

L'analyse des paramètres abiotiques a montré que le site de PK 21, situé dans la zone périurbaine avec une faible densité de la population, à l'abri des pressions urbaines et industrielles, présente les eaux plus acides ($4,24 \pm 0,38$ UC), bien oxygénées ($67,13 \pm 9,52\%$), une minéralisation moyenne accentuée, faiblement riches en nutriments (nitrates, nitrites, azote ammoniacal), une pollution organique et métallique faible. Par contre, dans les autres sites (NDOG, SIC, ZIBA et ZIBO), situés en milieu urbain densément peuplé et fortement industrialisé, les eaux souterraines sont moins acides, fortement minéralisées avec des valeurs de conductivité électrique atteignant $9400 \mu\text{S}/\text{cm}$ à ZIBA, hypoxiques, très colorées et turbides, très riches en nutriments et en métaux lourds, ont des températures très élevées et présentent une pollution organique excessive. Ces sites sont sujets à des pollutions domestiques, municipales et industrielles.

Certains paramètres abiotiques mesurés (épaisseur de la couche d'eau, température, CO_2 dissous, alcalinité, couleur, MES, turbidité, orthophosphates, Azote ammoniacal, nitrates, DCO, DBO_5 , les duretés calcique et magnésienne) ont montré une différence significative ($p < 0,01$) d'une saison à l'autre. Par contre d'autres paramètres tels que le pH, la conductivité électrique, les STD, la salinité, l'oxydabilité, les nitrites et la saturation en Oxygène dissous n'ont pas été significativement différents ($p > 0,05$) d'une saison à l'autre.

La typologie abiotique, réalisée par les Analyses de Classification Hiérarchique (ACH), en Composantes Principales (ACP) et Permutationnelle Multivariée des Variances, indique qu'il y'a un gradient de pollution des différents sites étudiés. Le site périurbain de PK 21 est le site le moins pollué, ceux de Ndogbong, de Cité SIC et de ZIBA sont moyennement pollués, tandis que le site de ZIBO est le plus pollué.

L'inventaire des communautés aquatiques souterraines a permis de recenser au total 4759 organismes dans les cinq sites prospectés. Ces organismes se répartissent en quatre (04) embranchements (Annélides, Arthropodes, Mollusques et Némathelminthes), six (06) classes (Achètes, Oligochètes, Crustacés, Insectes, Gastéropodes et Gordiacés), quatorze (14) ordres et trente (30) familles.

La faune du site périurbain de PK 21 est faible et diversifiée avec 196 organismes récoltés répartis dans 15 (quinze) familles, quatre (04) classes et trois (03) embranchements. On y note la présence d'un taxon stygobie, celui de Stenasellidae. Les investigations

morphologiques et biomoléculaires ont montré que les eaux de ce site témoin hébergent une nouvelle espèce stygobie du genre *Metastenasellus*, *Metastenasellus boutini*. Cette espèce se distingue clairement des autres espèces décrites et/ou séquencées du genre.

Dans le site de Ndogbong, la faune est faiblement diversifiée avec 615 organismes récoltés. La faune de Cité SIC est très pauvre et diversifiée avec seulement 138 organismes enregistrés. Le site de la zone industrielle de Bassa (ZIBA) a une faune riche et moyennement diversifiée tandis que la zone industrielle de Bonabéri (ZIBO) est riche et plus diversifiée avec 1442 organismes recensés.

Dans les sites urbains industrialisés, la faune est largement dominée par les taxons pollueurésistants tels que les Chironomidae, Lumbriculidae, Cyprididae, Cyclopidae, Culicidae, Psychodidae et Stratiomyidae. Par ailleurs, les fortes abondances de Mollusques (Lymnaeidae et Physidae) hôtes intermédiaires de Trématodes et de Schistosomes dans les sites industriels (ZIBA et ZIBO), constituent un risque potentiel d'émergence des helminthiases dans ces zones. Aussi, la mauvaise qualité physicochimique des eaux souterraines dans les sites urbains industrialisés et les teneurs élevées en éléments métalliques constituent un facteur de risque sanitaire pour les populations riveraines.

Les résultats de la distLM ont montré que les facteurs environnementaux contrôlant la distribution de la faune aquatique souterraine de la ville de Douala sont principalement l'altitude, le pH, le CO₂ dissous, la turbidité et le Magnésium. La température, l'alcalinité, l'oxydabilité, les nutriments (nitrites, nitrates et azote ammoniacal) et la DCO influencent aussi la distribution de cette faune, mais faiblement. La dbRDA indique que seulement 51,5% de la variation totale de la chimie de l'eau explique 17,7% de la variation totale de la faune étudiée.

Vue l'importance socio-économique des eaux souterraines et compte tenu de la dégradation de leur qualité, nous recommandons :

❖ **Aux populations,**

- la construction des puits respectant les normes de l'OMS, notamment la présence d'une margelle haute d'au moins 0,5 m, d'un couvercle en fer inoxydable, et l'aménagement des buses ;
- de changer de mentalités pour adopter un comportement éco-citoyen en utilisant des moyens appropriés pour l'évacuation des ordures et des eaux usées domestiques ;
- de traiter l'eau à domicile avant consommation, puis conserver l'eau de boisson dans des récipients propres.

❖ **Aux pouvoirs publics en collaboration avec les chercheurs,**

- l'extension du réseau d'adduction en eau potable de la Camwater dans la ville de Douala (jusque dans les zones périphériques) afin de lutter efficacement contre le manque d'eau et les problèmes liés à la consommation des eaux de mauvaise qualité ;
- la mise en place d'un programme d'information, d'éducation et de communication en direction des populations pour leur faire acquérir des comportements favorables à la préservation des ressources en eaux ;
- la mise sur pied d'un schéma directeur d'aménagement, de restauration, de gestion intégrée des ressources en eau et de protection de ces hydrosystèmes ;
- l'application rigoureuse des textes relatifs à la protection de l'environnement et au principe «pollueur-payeur » et le respect des normes de rejet pour les effluents industriels en imposant aux industries la construction des stations d'épuration qui permettront de réduire les charges polluantes des rejets dans l'environnement.

Au terme de cette étude, certaines questions ont pu être soulevées, ouvrant ainsi de nouveaux horizons de recherche qui peuvent se résumer en trois (03) points. (1) La réalisation des essais de toxicité en microcosme avec d'une part, les groupes polluosensibles pour déceler les concentrations limites de polluants entraînant leur fuite ou leur mort et, d'autre part, avec les groupes polluo-résistants pour déterminer les concentrations à effet perceptible ou non ; ceci afin de définir les cotes de tolérance propres au contexte camerounais pour ces organismes ; (2) Les dosages histologiques de métaux lourds chez les taxons les plus résistants à la pollution, afin d'étudier les phénomènes de bioaccumulation/bioamplification et mieux appréhender leur vulnérabilité et les risques sanitaires y afférents. (3) La construction des puits expérimentaux dans la zone périurbaine de PK 21 afin de mieux expliquer la pauvreté de la faune de cette zone.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Afonso O., 1987** : Contribution pour la connaissance des apports entre la qualité de l'eau phréatique et les communautés d'Asselides (Crustacea, Isopoda, Asselota). Publicaçones do instituto de zoologia « «Dr Augusto Nobre »198 : 1-61.
- Afonso O., 1992.** Phreatic water of Cavado basin (Northen Portugal): Faunistics, physico-chemical and bacteriological characterization. Publicaçones do instituto de Facultado Ciencias do Porto, 230, 21 P.
- Aguilar Ibarra A., Park Y.S., Brosse S., Reyjol Y., Lim P. & Lek S., 2005.** Nested patterns of spatial diversity revealed for fish assemblages in a West European River. *Ecology of Freshwater Fish*, 14: 233-242.
- AIEA (Agence Internationale de l'Energie Atomique), 2022.** Les eaux souterraines. <https://www.iaea.org/fr/themes/les-eaux-souterraines>, consulté le 05/07/2022
- Aït Boughrous A., 2007.** Biodiversité, écologie et qualité des eaux souterraines de deux régions arides du Maroc: le Tafilalet et la région de Marrakech. Thèse de Doctorat d'État, Faculté des Sciences. Université Cadi Ayyad Semlalia, Marrakech, Maroc 236 p.
- Akins, J. M., Schroeder, J. A., Browert, D. L., Aposhian, H. V., 1992.** Evaluation of *Drosophila melanogaster* as an alternative animal for studying the neurotoxicity of heavy metals. Department of Pharmacology and Toxicology and University Department of Molecular and cellular biology, University of Arizona, Tucson, AZ, USA, *biometals*, 5,111, 120
- Alliaume C., Lasserre G., Louis M., 1990.** Organisation spatiale des peuplements ichtyologiques des herbiers à Thalassia du Grand cul-de-Sac Marin en Guadeloupe. *Hydrobiologie Tropicale*, 23 : 231-250.
- Amoros C. & Petts G. E., 1993.** Hydrosystèmes fluviaux. Editions Masson, Paris
- Anderson M.J., 2001.** Permutation tests for univariate or multivariate analysis of variance and regression. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 58: 626-639.
- Anderson M.J., 2005.** Permanova: a Fortran computer program for permutational multivariate analysis of variance. Department of Statistics, University of Auckland, New Zealand.
- Angell N.F., Lavery J.P., 1982** - The relationship of blood lead levels to obstetric outcome. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, 142: 40 p.
- Anonyme, 2015.** Effets du changement climatique au Cameroun. <http://www.alternativesdurables.org/informations/effets-du-changement-climatique-au-cameroun>
- APHA (1998).** Standard method for examination of water and wastewater. American Public Health Association, 20th edition, Washington, DC, 1150p.

- Argano R. 1994.** Isopoda terrestria: Oniscidea. In. C. Juberthie. and V. Decu. (eds) *Encycopaedia Biospeologica*, T.1. Société de Biospéologie. Moulis-Bucarest, pp: 141-146.
- Auby I., Manaud F., Mauder D. & Trut G., 1994.** Etude de la prolifération des Algues vertes dans le bassin versant d'Arcachon, Ifremer- Cemagre, 192 p.
- Baize D. 1997-** Teneurs en éléments traces métalliques dans les sols (France). Paris : INRA, 401 p.
- Barbier O., Jacquillet G., Tauc M., Cougnon M., Poujeol, P., 2005.** Effect of heavy metals on, and handling by, the kidney. *NephronPhysiol* **99**: p105-110
- Bärlocher F. & Murdoch J. H., 1989:** Hyporheic biofilms- a potential food source for interstitial animals. *Hydrobiology*, 184:61-67.
- Benecke M., Gustav Eckert K., Erber B., 2004.** Guide pratique de toxicologie, 1ère édition, édition de Boeck and Larciens. A. ; 348 pp.
- Biney C., Amuzu A.T., Calamari D., Kaba N., Mbome L.I., Naeve H., Ochumba O., Osibanjo O., Radegonde V. Et Saad M.A.H., 1994.** Etude des métaux lourds. Revue de la Pollution dans l'Environnement Aquatique Africain, FAO, 25 : 37-67.
- Birdlife International / Coc, 1999.** – Cameroon important birds area. Resource document Cameroon Ornithological Club Yaoundé, Cameroon, 73 p.
- Bodin N., 2005.** Contamination des crustacés décapodes par les composés organohalogénés. Etude détaillée de la bioaccumulation des PCB chez l'araignée de mer *Maja brachydactyla*. Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, 328p.
- Bosca C., 2002.** Groundwater law and administration of sustainable development, Mediterranean. Magazine Science, training & technology, 13-17.
- Botosaneanu L., 1986.** *Stygofauna Mundi*. Leiden (The Netherlands), E. J. Brilland Dr.W. Backhuys, In: *Bulletin mensuel de la Société linnéenne de Lyon*, 55^e année, n°9. pp. 291-292
- Boulal M., 2002.** Recherche phréatobiologique dans le Souss et les régions voisines du Maroc occidental : Qualité de l'eau, Biodiversité, Ecologie et Biogéographie historique des espèces stygobies. Thèse de Doctorat d'État, Faculté des Sciences. Université Cadi Ayyad. Semlalia, Marrakech, Maroc. 443 p.
- Boulal M., Boulanouar M., Boutin C. & Yacoubi-Khebiza M., 2009.** Biodiversity in the stygobiotic cirrolanids (Crustacea, Isopoda) from the Mediterranean Basin: II – Systematics, ecology and historical biogeography of *Typhlocirolana tiznitensis* n. sp., the first representative of the genus, South of the Moroccan High Atlas. *Bulletin de la Société*

- d'histoire naturelle de Toulouse*, **145**: 11-28.
- Boulal M., Touyer A. & Boutin C., 1997.** Qualité de l'eau et de la faune aquatique des puits près d'Agadir, dans le secteur de la plaine de Sous (Maroc). *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Toulouse*, 133 :59-70.
- Boulanouar M., 1986.** Études écologiques comparées de quelques puits de la région de Marrakech. Impact des pollutions sur la zoocénose des puits. Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle, Université Cadi Ayyad, Faculté Sciences Semlalia, Marrakech, 207 p.
- Boulanouar M., 1995.** Faune aquatique des puits et qualité de l'eau dans les régions de Marrakech et des Jbilet. Statut et dynamique d'une population des *Proacellus coxalis africanus* (Crustacé Isopodes) des Jbilet. Thèse de Doctorat d'Etat. Université de Marrakech. 210 p.
- Boutin C. & Boulanouar M., 1983.** Méthodes de capture de la faune stygobie : Expérimentations de différents types de pièges appâtés dans les puits de Marrakech. *Bulletin de la Faculté Sciences de Marrakech (Section Sciences de la Vie)*, 2 :5-21.
- Boutin C. & Coineau N., 2004.** Marine Regressions. In D.C. Culver & W.B. White editions: *Encyclopedia of Caves*. Elsevier. Amsterdam, New York, Tokyo Pp. 361-366
- Boutin C. & Dias N., 1986.** Impact de l'épandage des eaux usées de la ville de Marrakech sur la nappe phréatique. *Bulletin de la Faculté des Sciences de Marrakech, Section Science de la Vie*, 3: 5-27.
- Boutin C., 1984.** Sensibilité à la pollution et répartition de quelques espèces de Crustacés phréatobies à Marrakech (Maroc). *Mémoire de Biospéologie*, Moulis, 11 (38): 55-64.
- Boutin C., 1993a.** Biogéographie historique des crustacés Isopodes Cirolanidea stygobies du groupe *Typhlocirolana* dans le bassin méditerranéen. C. R. Académie des Sciences de Paris, Sciences de la vie/ Life sciences, 316 :1505-10.
- Boutin C., 1993b.** L'eau des nappes phréatiques superficielles, une richesse naturelle vitale mais vulnérable. L'exemple des zones rurales du Maroc. *Revue des Sciences de l'Eau*, 6 (3): 357-365.
- Boutin C., Boulal M., Boulanouar M., Coineau N., Ghlala A., Merzoug D., Messouli M. & Yacoubi-Khebiza M., 2011.** Importance, dans les zones arides et semi- arides, de la biodiversité des faunes aquatiques souterraines. *Actes du Séminaire International sur la biodiversité faunistique en zones arides et semi –arides*. 18 p.
- Brosse S., Giraudel L., Lek S., 2001.** The temporal dynamic of fish population assemblages and community structure. *Ecological Modelling*, 146: 159-166.
- Brunke M. & Gonser T., 1997.** Groundwater law and administration of sustainable

- development, the ecological significance of exchange process between rivers and groundwater. *Freshwater Biology*, 37: 1-33.
- BUCREP (RGPH), 2010.** Résultats globaux du recensement des populations et de l'habitat de 2005. Mars 2010. Bureau Central de Recensement des populations, Yaoundé. 68 p.
- BUCREP, 2011.** Troisième Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH). Rapport technique d l'analyse des données. Volume 1, tome 8, 110 p.
- Burnol A., Duro L. M., Grive. M., 2006.** Recommandations pour la modération des transferts des éléments traces métalliques dans les eaux souterraines. Rapport final, BRGM/RP-52910 –FR, 73 pp
- Camara A., 2013.** Composition, structure et déterminisme des macroinvertébrés de la rivière Banco (Parc National du Banco ; Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Nangui Abrogoua, 151 p.
- Carrel G., Barthelemy D., Auda Y., Chessel D., 1986.** Approche graphique de l'analyse en principales normée : utilisation en hydrobiologie. *ActaOEcologica, OEcologia Generalis*, 7 : 189 – 203
- Casas-Stellio, 2005.** Modélisation de la bioaccumulation de métaux traces (Hg, Cd, Pb, Cu et Zn) chez la moule, *Mytilus galloprovincialis*, en milieu méditerranéen. Thèse de doctorat en Sciences. Océanologie biologique. Environnement marin. Université de Toulon, 363 p.
- Castany G., 1998.** Hydrogéologie, principes et méthodes. *Dunod*, Paris, 236 p.
- Chapman D. & Kimstach V., 1996.** Selection of water quality variables. Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring, Chapman edition, 2nd ed. E & FN Spon, London. 609 p.
- Chappuis, P. A, 1952.** Un nouveau *Stenasellus* du Congo belge. *Revue de Zoologie et de Botanique Africaines*, 45: 353-357.
- Chappuis, P. A., 1951.** Isopodes et Copépodes cavernicoles. *Revue de Zoologie et de Botanique Africaines*, 44: 342-359.
- Chassard-Bouchaud C., 1995.** L'écotoxicologie. Que sais-je ? Paris: PUF. 128 p.
- Chelius M.K., Beresford G., Horton H., Quirk M., Selby G., Simpson R.T., Horrocks R. & Moore J.C., 2009.** Impacts of alterations of organic inputs on the bacterial community within the sediments of Wind Cave, South Dakota, USA. *International Journal of Speleology*, 38 (1): 1-10.

- Cherry John A., 1987** : Groundwater Occurrence and Contamination in Canada » Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences, *Canadian Aquatic Resources*, M.C. Healey et R.R. Wallace (éd.), no. 215, p 395.
- Chinche SB, Piscart C, Mbanga Medjo P, Koji E, Tuekam Kayo RP, Zébasé Togouet SH., 2023.** Impact of altitude on spring macroinvertebrates and water quality in South West region of Cameroon. *International Journal of Limnology*. 59, 10.
- Chinche Sylvie B., 2021.** Impact of altitude and physicochemical parameters on groundwater quality and biodiversity in Fako Division, South West Region, Cameroon. Thèse de Doctorat/PhD, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I, 261 p
- Chinche Sylvie Belegfe, Zebaze Togouet Serge Hubert, Moanono Patrick Georges Thiery, Pountougnigni Oumarou F., Tuekam Kayo Raoul Polycarpe And Fomena Abraham, 2019.** Impact of physicochemical parameters on biodiversity and groundwater quality in Tiko, Cameroon. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 7(6): 39-46.
- Chippaux J. P., Houssier Sgross P., Bouvier C. & Brissaud F., 2002.** Étude de la pollution de l'eau souterraine de la ville de Niamey, Niger. *Bulletin Society Pathology Exotica*, 94 (2): 119-123.
- CIEau** (Centre d'Information sur l'Eau), 2018. L'eau dans l'Univers. www.cieau.com, consulté le 28 décembre 2024.
- Cluva, 2012.** Changements climatiques et vulnérabilité des villes africaines : Douala Cameroun, 2p. <http://www.cluva.eu>.
- Coineau N., Henry J. P., Magniez G. Et & Negoescu I., 1994.** Isopoda Aquatica. In: *Encyclopedia Biospeologica*, C. Juberthie and V. Decu edition, Tome 1. Société de Biospéologie, Moulis, Bucarest. Pp: 123-140.
- Cosserate M., Decan J., Patcq H., Crontzet & Puljol B., 1990.** Irrigation fertilisante en sol sablocaillouteux: Conséquences sur la production et la pollution par les nitrates. In. R. Calvet, nitrates-agriculture-eau, Versailles. Inra- Edition.
- Costa F, Henzler C, Lunt D, Whiteley Nm & Rock J., 2009.** Probing marine Gammarus (Amphipoda) taxonomy with DNA barcodes. *Systematics and Biodiversity* 7: 365–379
- Creuzé Des Châtelliers M. & Dole-Olivier M. J., 1991.** Limites d'utilisation du sondage de type Bou-Rouch pour la capture de la faune interstitielle. (I) traçage chimique au Chlorure de Sodium, *Académie des Sciences de Paris*, 312, 3: 671-676.
- Creuzé Des Châtelliers M., Turquin M.J. & Gibert J., 1991.** Les aquifères : des systèmes biologiques. *Hydrogéologie* 3: 163-185.

- CUD, 2012.** Plan Directeur d'Urbanisme de Douala horizon 2025. 241p.
- Culver D.C. & Holsinger J.R., 1992.** How many species of troglobites are there? *NSS Bulletin*, **54**: 79-80.
- Cvetkov L., 1968.** Un filet phréatobiologique. *Bulletin de l'Institut de Zoologie et Musée, Sofia*. Pp: 215-219.
- Dajoz R., 2000.** Précis d'Ecologie. 7^{ème} édition, Dunod, Paris, France, 615 p.
- Danielopol D. L., Gibert J., Griebler C., Gunatilaka A., Hahn H. J., Messana G., Notenboom J. & Sket B., 2004.** Incorporating ecological perspectives in European groundwater management policy. *Environmental Conservation* 31 (3): 185-189.
- Danielopol D. L., Griebler C., Gunatilaka A. & Notenboom J., 2003.** Present state and future prospects for groundwater ecosystems. *Environmental Conservation* 30 (2): 104-130.
- Danielopol D. L., Pospisil P. & Rouch R., 2000.** Biodiversity in groundwater: a large-scale view. *Trends in Ecology and Evolution* 15(6): 223-224.
- Darriba D, Taboada GI, Doallo R & Posada D., 2012.** jModelTest 2: more models, new heuristics and parallel computing. *Nature Methods* 9: 772 p.
- Daubrée A., 1987.** Les eaux souterraines à l'époque actuelle. Dunod, Paris, 455 p.
- Degremont, 2005.** *Mémento technique de l'eau*, Editions Lavoisier, Paris. 785 p.
- Deharveng, L., Stoch, F., Gibert, J., Bedos, A., Galassi, D., Zigmajster, M., Brancelj, A., Camacho, A., Fiers, F., Martin, P., Giani, N., Magniez G. & Marmonier, P. (2009).** Groundwater biodiversity in Europe. *Freshwater Biology*, **54** (4): 709-726
- Denis Baize, 1997.** Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. INRA Éditions, 401 p.
- Derwich E., Benaabidate L., Zian A., Sadki O. & Belghity D., 2010.** Caractérisation physico-chimique des eaux de la nappe alluviale du haut Sebou en aval de sa confluence avec l'oued Fès. *Larhyss Journal*, 2568 (8): 101-112.
- Din Ndongo, 2001.** Mangroves du Cameroun, Statut écologique et perspectives de gestion durable. Thèse de Doctorat d'Etat, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I, 252 p.
- Djuikom E., L. B. Jugnia & Nola M., 2011.** Assessment of the quality of waters in wells at Bépanda quarter, Douala-Cameroon, by use of the indicator bacteria of faecal contamination. *Journal of Applied Biosciences*. 37: 2434-2440.
- Dolédec S. & Chessel D., 1994.** Co-inertia analysis: an alternative method for studying species - environment relationships. *Freshwater Biology*, 31 : 277-294.
- Dole-Olivier M.-J., Castellarini F., Coineau N., Galassi D.M P., Martin P., Mori N. & Valdecasas A J.G., 2009.** Towards an optimal sampling strategy to assess groundwater

- biodiversity : comparison across six European regions. *Freshwater Biology*, **54**: 777-796.
- Dufrene M. & Legendre P., 1997.** Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*, **67** : 345-366.
- Dupont A., 1981.** Hydraulique Urbaine : Hydrologie, captage et traitement des eaux. Eyralles édition, Paris, 1300 p.
- Durand J. R. & Leveque C., 1980.** *Flore et Faune aquatique de l'Afrique Sahélo-Soudanienne Tome 1*. ORSTOM, Document Technique 44, Paris, France. 389 p.
- Edgar R. C., 2004.** MUSCLE: multiple sequence alignment with high accuracy and high throughput. *Nucleic Acids Research* **32**: 1792–1797.
- El Mostafa Hassoune, Abdelhamid Bouzidi, Yahia Koulali & Driss Hadarbach, 2006.** Effets des rejets liquides domestiques et industriels sur la qualité des eaux souterraines au nord de la ville de Settat (Maroc). *Bulletin de l'Institut Scientifique*, Rabat, section Sciences de la Vie, n°28, 61-71.
- El Yamine N., 1978.** Alimentation en eau de certaines villes du Maroc, protection des aquifères, aspects législatif et sanitaire (1ère partie). *Mines. Géol. Rabat*, **43**: 7-42
- Entsua-Mensah M., 2002.** The contribution of coastal lagoons to the continental shelf ecosystem of Ghana. In McGlade J.M., Cury P., Koranteng K.A. & Hardman N.J. *The Gulf of Guinea Large Marine Ecosystems*. Mount ford (Eds.), pp 161-187.
- Ferreira D., 2005.** Biodiversité aquatique souterraine de la France: base de données, patrons de distribution et implications en termes de conservation. *Thèse de Doctorat*, Université Claude Bernard, Lyon I, France. 230 p.
- Feuillade M., 1972.** Croissance d'*Oscillatoria rubescens* et variations quantitatives de la chlorophylle et des différent caroténoïdes en fonction d'éclairement. *Information Systems Division, National Agricultural Library*, **3**: 21–31.
- Folmer O., Black M., Wr H., Lutz R., Vrijenhoek R., 1994.** DNA primers for amplification of mitochondrial Cytochrome C oxidase subunit I from diverse metazoan invertebrates. *Molecular Marine Biology and Biotechnology* **3**: 294–9.
- Friedrich G., Chapman D. & Beim A., 2001.** The use of biological material. In: D. Chapman, *Water quality assessment: a guide to the use of biota, sediment and water in environmental monitoring*, edition *Chapman & Hall*. Pp 171-238.
- Gaujous, 1995.** La pollution des milieux aquatiques : aide-mémoire. *Technique de documentation*. Ed. Lavoisier. Paris. 220 p.
- Gibert J. & Culver DC., 2009.** Assessing and conserving groundwater biodiversity: an introduction. *Freshwater Biology* **54**: 639-648.

- Gibert J., & Culver D. C., 2004.** Diversity patterns in Europe. In: Encyclopedia of Caves, Culver D. C. & White W. B. (Eds.), *Elsevier Academic Press*, Pp 196-201.
- Gibert J., Culver D.C., Danielopol D.L. Griebler C., Gunatilaka A., Notemboom J. & Sket B., 2004.** Groundwater ecosystems: human impact and future management. Aquatic ecosystems: Trends and global prospect. N.V.C. polumin. *Cambridge University Press*, Cambridge.
- GIEC, 2014.** Résumé à l'intention des décideurs de la synthèse du 5e rapport d'évaluation du GIEC. www.developpement-durable.gouv.fr/giec. 40 p.
- Gilbert J., Danielopol D. L. And Stanford J. A. 1994.** *Groundwater Ecology*. In: Gibert J, Danielopol D. L & Stanford J. (eds). Academic Press, San Diego. 571 p.
- Ginet R. & Decou V., 1977.** Initiation à la biologie et à l'écologie souterraine. J. P Delarge édition, Paris France. 345 p.
- Giraudel L. & Lek S., 2001.** A comparison of self-organizing map algorithm and some conventional statistical methods for ecological community ordination. *Ecological Modelling*, 146 : 329-339.
- Glele Kakai R., Salako V., Padonou E., Lykke A., 2016.** Méthodes statistiques multivariées utilisées en Ecologie. *Annales des Sciences Agronomiques*, 20 :139-157.
- Goaziou, Y., 2004.** Methods of Biotic Integrity Assessment of Aquatic Environment Based on Benthic Macroinvertebrates: Training Report. Direction of Environment State Monitoring, Quebec.
- Godt J., Scheidig F., Grosse-Siestrup C., Esche V., Brandenburg P., Reich A., And Groneberg, D., 2006.** The toxicity of cadmium and resulting hazards for human health. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology* **1**: 22-27
- Gouy M, Tannier E, Comte N, Parsons Dp., 2021.** Seaview Version 5: A multiplatform software for multiple sequence alignment, molecular phylogenetic analyses, and tree reconciliation. *Methods in Molecular Biology* (Clifton, N.J.) 2231: 241–260.
- Grall, J. & C. Hily., 2003.** Traitement des données stationnelles (faune), 10 p, [En ligne][URL:http://www.rebent.org//medias/documents/www/contenu/pdf/document/Fiches_tchniques/FT10-2003-01.pdf](http://www.rebent.org//medias/documents/www/contenu/pdf/document/Fiches_tchniques/FT10-2003-01.pdf)
- Griebler A. C., Stein B. H., Kellermann A. C., Berkhoff B. S., Brielmann A. H., Schmidt C S., Selesi A. D., Steube A. C., Fuchs A., Jurgen H. And Hahn B., 2010.** Ecological assessment of groundwater ecosystems – Vision or illusion? *Ecological Engineering*, **36**: 1174–1190.

- Gubry P., Negadi G. Et Tayo J., 1983.** La population. ORSTOM. Fonds Documentaire, 2(1),7–38.Retrieved from http://horizon.documentation.ird.fr/exldoc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_1415/17845.pdf.
- Guillemin C. & Roux J.C., 1992.** La pollution des eaux souterraines, BRGM, édition Journal Officiel du 4 janvier 1989 et du 10 juin 1989.
- Guindon S., Dufayard J. F., Lefort V., Anisimova M., Hordijk W. & Gascuel O., 2010 :** New Algorithms and Methods to Estimate Maximum-Likelihood Phylogenies: Assessing the Performance of PhyML 3.0, *Systematic Biology* 59(3) : 307–321.
- Guyonnet B., Aliaume C., Albaret J.-J., Casellas C., Zerbi A., Lasserre G. & Do Chi T., 2003.** Biology of *Ethmalosa fimbriata* (Bowdich) and fish diversity in the Ebrie Lagoon (Ivory Coast), a multipolluted environment. *Journal of Marine Science*, 60: 259-267.
- Hervant F. & Malard F., 2005.** Adaptation to low oxygen. In Culver, D. C., and white, W. B. eds., Encyclopedia of Cases, Amsterdam, *Elsevier*, P. 10-17.
- Hervant F. & Renault D., 2002.** Long-term fasting and realimentation in hypogean and epigean isopods: a proposed adaptive strategy for groundwater organisms. *Journal of Experimental Biology*. 205, 2079-2087.
- Hervant F., Garin D., Mathieu J. & Freminet A., 1999.** Comparative study on the metabolic responses of subterranean and surface-dwelling amphipods to long-term starvation and subsequent refeedind. *Journal of Experimental Biology*, V. 202, P. 3587-3595.
- Hervant F., Mathieu J. & Durand J., 2001.** Behavioral, physiological and metabolic responses to long-term starvation and refeeding in the blind cave-dwelling (*Proteus anguinus*) and a surface-dwelling (*Euproctus asper*) salamander. *Journal of Experimental Biology*. 204, 269-281.
- Holt J. G., Kreing N. R., Sneath P. H. A., Staley J. T. & Willians S. T., 2000.** *Bergy's Manual of Determinative Bacteriology*. 9th edition Philadelphia. Lippincott Willian and Wilkins 78 p.
- Humphreys W.F., 2009.** Subterranean Ecosystems. Ecosystems of the world 30, Elsevier, Amsterdam, Pp: 417-432.
- Humphreys, W. F., 2000.** Relict faunas and their derivation. In: Wilkens H. Culver D. C. and Humphreys W. F. (Eds.) Subterranean Ecosystems. Ecosystems of the World 30, *Elsevier*, Amsterdam, Pp. 417-432.
- Idbennacer B., 1990.** Recherches écologiques, biogéographiques et démographiques sur la faune aquatique souterraine de la région de Guelmim (Sud-ouest de l'Anti-Atlas

- marocain). Thèse de 3^{ème} Cycle, Faculté des Sciences de Semlalia, Marrakech, 275 p.
- Il'yasova D., & Schwartz G. G., 2005.** Cadmium and renal cancer. *Toxicology and Applied Pharmacology* **207**: 179-186
- Institut National de la Statistique (INS), 2015.** Annuaire statistique de la région du Nord-Ouest-2014, 15.
- Institut National de la Statistique (INS), 2021.** Annuaire statistique de la région du littoral : Recueil des séries d'informations statistiques sur les activités économiques, sociales, politiques et culturelles de la région jusqu'en 2020. 629 p.
- Institut National de Statistique (INS), 2013.** Statistique annuelle 2013, Yaoundé- Cameroun.
- IRD & Institut Français, 2015.** L'eau au Cœur de la science. 5 p
- Issartel J., 2007.** Adaptation de la faune souterraine aux basses températures : mécanismes et enjeux écologiques. Thèse de Doctorat PhD. Université Claude Bernard-Lyon I, 164 p.
- Jain S., 2012.** Assessment of water quality at the three Stations of Chambal River. *International Journal of Environmental Sciences*, 3: 881-884.
- Jamin P., 2019.** Groundwater and contaminant mass fluxes monitoring in heterogeneous aquifers. PhD thesis In Applied Sciences at the University of Liège, Belgium. 201p.
- Jeannot R., Lemiere B. & Chiron S., 2002.** Guide méthodologique pour l'analyse des sols pollués, édition BRGM, 122pp.
- JICA-MATET-ONNED., 2008.** Compte rendu du séminaire Conjoint Algérie Japon pour une gestion efficace de l'Environnement. Alger, du 21 au 22 avril 102 p.
- Juberthie C. & Decu V. (eds.) 2001.** Encyclopaedia Biospeologica. Société de Biospéologie, Moulis – Bucarest, 3 :1374-2294.
- Juberthie C., 1983.** Le milieu souterrain ; théories et modèles, relation avec la spéciation et l'évolution souterraines. *Mémoire de Biospéologie*, Moulis, 16, 43: 3-14.
- Juberthie C., 1995.** Les habitats souterrains et leur protection. Sauvegarde de la nature n°72, éditions du Conseil de l'Europe 1995, 101 p.
- Juberthie, C., & V. Decu. 1994.** Encyclopaedia Biospeologica. Tome 1. Société de Biospéologie. Moulis (France)-Bucarest (Roumanie), 834p.
- Kapli P, Lutteropp S, Zhang J, Kobert K, Pavlidis P, Stamatakis A, Flouri T., 2017.** Multi-rate Poisson tree processes for single-locus species delimitation under maximum likelihood and Markov chain Monte Carlo, *Bioinformatics* 33: 1630 – 1638.

- Kimura M., 1980.** A simple method for estimating evolutionary rates of base substitutions through comparative studies of nucleotide sequences. *Journal of Molecular Evolution* 16:111–120.
- Kiviluoto K., 1996.** Topology preservation in Self-Organizing Maps. Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks. IEEE Service Center, New York: Pp 294-299.
- Kohonen T., 1982.** Self-Organized formation of topologically correct features maps. *Biological Cybernetics*, 43: 59-69.
- Kohonen T., 2001.** Self-Organizing Maps (3rd Edition). Springer-Verlag, Berlin, Germany, 501 p.
- Kolonel L. N., 1976.** Association of cadmium with renal cancer. *Cancer* **37**: 1782-1787.
- Korbie, D.J. And Mattick, J.S., 2008** Touchdown PCR for Increased Specificity and Sensitivity in PCR Amplification. *Nature Protocols*, 3, 1452-1456.
- Kouadio N., 2011.** Diversité et structure des peuplements de macroinvertébrés benthiques des lagunes de Côte d'Ivoire : Aby, Ebrié et Grand-Lahou. Thèse de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 162 p.
- Kourradi R., 2007.** Evaluation du degré de la pollution anthropique de l'estuaire de Bou Regreg et impact sur la biologie et la dynamique de *Scrobicularia plana* (Linné, 1758) et *Solen marginatus* (Linné, 1767). Thèse de Doctorat d'Etat, Faculté des Sciences, Université Mohammed V-Agdal. 313 p.
- Krzanowski W., 1988.** Principles of multivariate analysis. *A user's perspective*. Clarendon Press, Oxford, 608 p.
- Lacoue-Labarthe T., 2007.** Incorporation des métaux dans les œufs de laseiche commune *Sepia officinalis* et effets potentiels sur les fonctions digestives et immunitaires. Thèse de doctorat : Océanologie Biologique & Environnement Marin. 200 p.
- Lecerf A., 2005.** Perturbations anthropiques et fonctionnement écologique des cours d'eau de tête de bassin : étude du processus de décomposition des litières. Thèse de doctorat en Ecologie fonctionnelle. Université de Toulouse 3. 159 p.
- Legendre L. & Legendre P., 1979.** Ecologie Numérique. Masson (Eds), Paris (France), 1-2, 247 p.
- Legendre, P. & Anderson, Mj., 1999.** Analyse de redondance basée sur la distance : tester les réponses multispécifiques dans des expériences écologiques multifactorielles. *Monographies Écologiques* 69, 1–24.

- Lek S., Giraudel L., Guégan F., 2000.** Neuronal networks: algorithms and architectures for ecologists and evolutionary ecologists. In: Lek S. & Guégan J.F. (Eds.): Artificial Neuronal Networks: Application to Ecology and Evolution. Springer - Verlag, Berlin : Pp 3-27.
- Leroy M., 2004.** Gestion stratégique des écosystèmes dans un contexte d'aide internationale. Engagements environnementaux et dispositifs de gestion dans la vallée du fleuve Sénégal. ENGREF, Paris. 613
- Lévêque C. & Balian E.V., 2005.** Conservation of freshwater Biodiversity: does the real world meet scientific dream? *Hydrobiologia*, 542: 25-26.
- Lincoln R. J., 1972.** - *Metastenasellus wikkiensis* sp. n. from warm-water springs in north-eastern Nigeria (Asellota : Aselli- dae : Stenasellinae). *Bulletin of the British Museum (Natural History) Zoology*, London, 24 (3): 213-221.
- Lu F.C., 1991.** Toxicologie, données générale, procédures d'évaluation, organes cibles, évaluation des risqué, édition Masson, Paris, 361 pp.
- Mace G.M., Norris K. & Fitter A.H., 2012.** Biodiversity and ecosystem services: a multilayered relationship. *Trends in Ecological Evolution*, 27(1):19–26
- Magniez G., 1966.** - Contribution à la systématique des Stenasellinae d'Afrique (Crustacea Asellota). *International Journal of Speleology* 2: 173-190.
- Magniez G., 1979a.** - *Metastenasellus powelli* sp. n., a new Stcna- sellid Isopod Crustacean from littoral groundwaters of Southeastern Nigeria. *Crustaceana*, 37 (3): 265-276.
- Magniez G., 1979b.** - Un Stenasellide phréatique de Côte d'Ivoire: *Metastenasellus tarrissei* n. sp. (Crustacé Isopode Asellote). *Bull, sc. Bourg.*, 32 (2) : 97-106.
- Magniez G., 1986.** - Répartition trans-saharienne de *Metastenasellus* Magniez ; description d'une nouvelle espèce d'Algérie (Isopoda Asellota). *Stygologia*, 2 (2) : 267-275.
- Magniez G., 1991.** Bons et mauvais caractères taxinomiques: exemple des Stenasellides d'Extreme-Orient. *Memoires de Biospeleologie* 18: 99–104.
- Magniez G., 1999.** A review of the family Stenasellidae (Isopoda, Asellota, Aselloidea) of underground waters. *Crustaceana* 72: 837–848.
- Malard F. & Hervant F., 1999.** Oxygen supply and the adaptations of animals in groundwater. *Freshwater Biology* 5. (41), 30 p.
- Malard F., Ferreira D., Dolédec S. & Ward J. V., 2003.** Influence of groundwater upwelling on the distribution of the hyporheos in a headwater river flood plain. *Archiv für Hydrobiologie* 157(1): Pp 89-116.

- Malard F., Gibert J. & Laurent R., 1997.** L'aquifère de la source du Lez : un réservoir d'eau et de biodiversité. *Karstologia* 30: Pp 49-54.
- Manly B.F.J., 1997.** Randomization, bootstrap and Monte Carlo methods in biology, 2nd edition. Chapman and Hall, London.
- Margat J. & Vazken A., 2014.** Allons-nous manquer d'eau.V1, édition le pompier. 128 p
- Margat J., 2008.** Les eaux souterraines dans le monde. Ed. BRGM, Orleans/UNESCO, 178 p.
- Marmonier P., Vervier P., Gibert J. & Dole-Olivier M. J., 1993.** Biodiversity in ground waters. *Trends in Ecology & Evolution*, 8 (11): 392-395.
- Mary N., 1999.** Caractérisations physicochimique et biologique des cours d'eau de la Nouvelle-Calédonie, proposition d'un indice biotique fondé sur l'étude des macroinvertébrés benthiques. Thèse de Doctorat, Université Française du Pacifique, France, 200 p.
- Mathieu J. & Turquin M. J., 1992:** Biological processes at the population level II. Aquatic Populations: Niphargus (stygoibiont Amphipod) case- In: The Natural History of Biospology. A. I. Camacho Ed., Museo Nacional de Ciencias Naturales (Madrid): 263-293.
- Maurice L. & Bloomfield J., 2012.** Stygobitic Invertebrates in Groundwater — A Review from a Hydrogeological Perspective. *Freshwater Reviews*, 5 (1): 51-71.
- Maurice L., 2009.** Groundwater Ecology Literature Review. British geological Survey Open Report, OR/09/061, 37.
- Mbaha, J. P., Olinga, J. M. Et Tchiadeu, G., 2013.** Cinquante ans de conquête spatiale à Douala : D'héritage colonial en construction à patrimoine socio-spatial vulnérable aux risques naturels in Actes du Colloque des cinquantenaires, La réunification du Cameroun : Bilans, défis et perspective, FLSH, Université de Douala. Pp 145–165.
- Mccune B. & Grace B., 2002.** Analysis of Ecological Communities. *Oregon*, USA. 300 p.
- Menetrey Perrottet N. (2009).** Elaboration d'une méthode d'évaluation de la qualité écologique des petits plans d'eau basée sur les communautés de macroinvertébrés. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences, Université de Genève, 188p.
- Merzoug D., Khiari A., Boughrous A.A. & Boutin C., 2011.** Faune aquatique et qualité de l'eau des puits et sources de la région d'Oum-El-Bouaghi Aquatic fauna and water quality from wells and springs in the region of Oum-El-Bouaghi (North-East of Algeria). *Hydroécologie Appliquée*, 17 : 77–97.
- Milosevic D., Stojkovic M., Čerba D., Petrovic A., Paunovic M., Simic V., 2014.** Different aggregation approaches in the chironomid community and the threshold of acceptable information loss. *Hydrobiologia*, 727 : 35-50.

- Mission D'aménagement et de la Gestion des Zones Industrielles (MAGZI), 2020.**
<https://magzicameroun.com/fr/amenagement-et-gestion-des-zones-industrielle>
- Monod TH., 1924.** Sur quelques Asellides nouveaux des eaux douces de l'Afrique du Nord. Bulletin de La Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord: 327–336.
- Montgomery C.W., 1992.** Environmental Geology. Brown Publishers, New York, USA, 465 p.
- Moore M.R., Meredith P.A., Watson W.S., Sumner D.J., Taylor M.K., Goldberg A., 1980.**
 The percutaneous absorption of lead-203 in humans from cosmetic preparations containing lead acetate, as assessed by whole-body counting and other techniques. *Food and Cosmetics Toxicology*, 18: 399 p.
- Morvan C., 2013.** Approche phylogénique pour l'étude des patrons macroévolutifs et processus sous-jacents dans les eaux souterraines. Thèse de Doctorat PhD, Université Claude Bernard de Lyon I. 289 p
- Moucherou O.F., Moundi A., Remy J., Ngoupayou N., Ako A.A. & Wandji P., 2011.**
 Paramètres chimiques et source lithologique de la minéralisation des eaux souterraines des aquifères du Plateau Bamoun, Ligne Volcanique du Cameroun (LVC). *Review of the Bulgarian Geological Society*, 72: 67–78.
- Musa Ko, Kudamnya Ea, Omali Ao, Akuh TI., 2014.** Physico- chemical characteristics of surface and groundwater in Obajana and its environs in Kogi state, Central Nigeria. *African Journal of Scientific Technology*, 8: 521–531.
- Nabil Bougherira, Azzedine Hani, Fayçal Toumi, Nadjib Haied & Larbi Djabri, 2017:**
 Impact des rejets urbains et industriels sur la qualité des eaux de la plaine de la Meboudja (Algérie), *Hydrological Sciences Journal*.
- Nana Nkemegni G., 2017.** Biodiversité de la stygofaune dans les Hauts Plateaux Bamoun (Ouest- Cameroun). Thèse de Doctorat/PhD, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I, 173 p.
- Nana Nkemegni G., Zebaze Togouet S. H., Boulanouar M., Boutin C. & Coineau N., 2022.**
 The first groundwater cirolanid from central Africa, *Camerounolana bamounensis* gen. nov. sp. nov. of Cameroon: description and origin. *Bulletin de Sociologie et d'Histurelle Naturelle de Toulouse* 158, 83-93.
- Nola M., Njine T., Monkiedje A. & Taillez R., 1999.** – Approche calorimétrique des eaux de la nappe phréatique superficielle de la ville de Yaoundé (Cameroun). *Microbiologie Hygiène Alimentaire*, 31: 9-13.
- Nola M., Njine T., Zebaze T. S. H., Menbohan F. S., Monkiedje A., Servais P., Messouli M. & Boutin C., 2005.** Retention of staphylococci and total coliforms during waste

- water percolation through equatorial soil in central Africa: the role of the soil column near soil surface and that closely above groundwater table. *Water, Air and Soil Pollution*, 171 (4): 253-271.
- Nola M., Nougang M.E., Noah Ewoti O.V., Mougang L.M., & Krier F., 2012.** Detection of pathogenic *Escherichia coli* strains in groundwater in the Yaoundé region (Cameroon, Central Africa). *Water and Environment Journal*.
- Norseth T., 1981.** *Environmental Health Perspectives*, 40, Pp 121- 130.
- Notenboom J., 1991.** Marine regressions and the evolution of groundwater dwelling Amphipods (Crustacea). *Journal of Biogeography*, 18: Pp 437-454.
- Nougang M.E., Nola M., Djuikom E., Noah Ewoti O.V., Mougang L.M. & Ateba Bessa H., 2011.** Abundance of faecal coliforms and pathogenic *Escherichia coli* strains in groundwater in the coastal zone of Cameroon (Central Africa), and relationships with some abiotic parameters. *Current Research Journal of Biological Sciences*, 3: 622-632.
- Nsegbe, A.D.P., Tchiadeu, G M., Mbaha, J.P., Ngangue, C.D. et Olinga Olinga, J.M., 2014.** Douala : une ville d’occupation et d’immigration, Pp 21–39.
- O.S.E.E.D., 2005.** Les entreprises industrielles à Douala: Rapport provisoire d’étape sur le contribuable urbain. Observatoire de la Statistique et des Etudes Economiques de Douala, Collection « Entreprises & Territoire », 67 p.
- OMS, 2011.** Guidelines for Drinking-water Quality. World Health Organization, 4th ed. WHO Press, 564p.
- OMS, 2019.** Stratégie de l’OMS sur l’eau, l’assainissement et l’hygiène 2018-2025. Genève : Organisation mondiale de la Santé, 2019. (WHO/CED/PHE/WSH/18.03)
- Otabbong E., 1990.** *Soil Sci. Plant Anal.*, 21 687- 703.
- Park S., Cereghino R., Compin A., Lek S., 2003.** Applications of artificial neural networks for patterning and predicting aquatic insect species richness in running waters. *Ecological Modelling*, 160: Pp 265-280.
- Pascalis, 2009.** Towards an optimal sampling strategy to assess groundwater biodiversity: comparison across six European regions. *Freshwater Biology*, 54: Pp 777–796.
- Petesse M.L., Petrere M. & Spigolon R.J. (2007).** Adaptation of the Reservoir Fish Assemblage Index (RFAI) for assessing the Barra Bonita Reservoir (Sao Paulo, Brazil). *River Research and Applications*, 23: 595-612.
- Philippeau G., 1992.** Comment interpréter les résultats d’une analyse en composantes principales. Service des Etudes Statistiques – ITCF, 63 p.
- Pichard Annick., 2003.** Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances

- chimiques, plomb et ses dérivés. 90 p.
- Piscart C., Marmonier P. & Gibert J., 2008.** Métrique biologique : faune souterraine. Dans Evaluation des échanges nappes/rivière et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, zones humides). Application au fleuve Rhône et à ses aquifères superficiels. Rapport final phase 2 du projet action recherche valorisation de la Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR) n°A 11.
- Piscart, C., Navel, S., Maazouzi, C., Montuelle, B., Cornut, J., Mermillod-Blondin, F., Creuzé Des Châtelliers, M., Simon, L., 2011.** Leaf litter recycling in benthic and hyporheic layers in agricultural streams with different types of land use. *Sciences of the Total Environment*, **409**: Pp 4373-4380
- Pixie A. H. & Dennis R. H., 1995.** Effects of agriculture on ground-water quality in five regions of the United States. *Groundwater*. 33(2). Pp 217-226.
- Pons J., Barraclough TG., Gomez-Zurita J., Cardoso A., Duran DP., Hazell S., Kamoun S., Sumlin WD., Vogler AP., 2006.** Sequence-Based Species Delimitation for the DNA Taxonomy of Undescribed Insects, *Systematic Biology* 55: Pp 595–609.
- Porse E. C., 2013.** Stormwater Governance and Future Cities. *Water*, 5: Pp 29-52.
- Puillandre N., Brouillet S. & Achaz G., 2021.** ASAP: assemble species by automatic partitioning. *Molecular Ecology Resources* 21: 609–620.
- Puillandre, N.; Lambert, A.; Brouillet, S.; Achaz, G., 2012.** ABGD, Automatic Barcode Gap Discovery for Primary Species Delimitation. *Molecular Ecology*. 2012, 21, 1864–1877.
- Ramade F., 2000.** Dictionnaire encyclopédique des pollutions, les polluants de l'environnement à l'homme. Ediscience international, Paris, 50-186pp.
- Ramade F., 2002.** Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement. 2^{ème} édition. Dunod, Paris.
- Ramade, F., 2005.** Eléments d'écologie. Ecologie appliquée. 6e édition. Dunod, Paris. 2005. XXXI + 864 pages. ISBN 2-10-006838-5 (broché)
- RéFEA., 2003.** Réseau Francophone sur l'Eau et l'Assainissement. www.oie.fr/ReFEA/, mise à jour : 25 juin 2003.
- Revathi P., Iyapparaj P., Vasanthi L.A., Munuswamy N. & Krishnan M., 2013.** Impact of TBT on the vitellogenesis and sex hormones in freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* (De Man, 1879). *Aquatic Biosystems*, 9: 1-10.
- Robert, 1987.** Dictionnaire méthodique du français actuel, édition le robert, Paris.
- Rodier J., 2002.** *L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires et eau de mer*. 8^{ème} édition, Dunod Paris France, 1136 p.

- Rodier J., Legube B., Marlet N. & Brunet R., 2009.** L'analyse de l'eau. 9^e édition, Dunod, Paris, France, 1579 p.
- Roger Feumba, Ngounou Ngatcha Benjamin, Jean Ghislain Tabué Youmbi, Georges Emmanuel Ekodeck, 2011.** Relationship between Climate and Groundwater Recharge in the Besseke Watershed (Douala-Cameroon). *Journal of Water Resource and Protection*, 3, 607-619
- Rouch R. & Danielopol D. L., 1987.** L'origine de la faune aquatique souterraine, entre le paradigme du refuge et le modèle de la colonisation active. *Stygologia* 3(4): 345-372.
- Savary P., 2003.** Guide des analyses de la qualité de l'eau. Dossier d'expert, editionstechni. Cité, 87-194 pp.
- Scharler U.M. & D. Baird., 2003.** The influence of catchment management on salinity nutrient stoichiometry and phytoplankton biomass of Eastern Cape estuaries, South Africa. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 56: 735-748.
- Simboura N. & Zenetos A., 2002.** Benthic indicators to use in Ecological Quality classification of Mediterranean soft bottom marine ecosystem, including a new Biotic Index Mediterranean Marine Science, 3(2), 77-111.
- Sinton L. W., 1984.** Groundwater contamination in New Zealand. *New Zealand Environment*. 42: 21-25.
- Sket B., 2004.** Biodiversity in hypogean waters. In: *Encyclopedia of caves and karst science*, Gunn, J. (ed). Taylor & Francis Book, Pp: 141-142.
- Song M., Leprieur F., Thomas A., Lek-Ang S., Chon T., Lek S., 2009.** Impact of agricultural land use on aquatic insect assemblages in the Garonne river catchment (SW France). *Aquatic Ecology*, 43: 999-1009.
- Statsoft France, 2005.** STATISTICA (logiciel d'analyse de données), version 7.1. www.statsoft.fr
- Stein H., Kellermann C., Schmidt S.I., Brielmann H., Steube C., Berkhoff S.E., Fuchs A. Hahn H.J., Thulin B. & Griebler C., 2010.** The potential use of fauna and bacteria as ecological indicators for the assessment of groundwater ecosystems. *Journal of Environmental Monitoring*, 12: 242-254.
- Stephane Guindon, Jean-François Dufayard, Vincent Lefort, Maria Anisimova, Wim Hordijk & Olivier Gascuel, 2010.** New algorithms and methods to estimate maximum-likelihood phylogenies: assessing the performance of PhyML 3.0 *Systematic Biology* May; 59 (3):307-21.
- Stephanie, A., Emmanuel, B., Marie, B., François, H., Laurence, L., Maud, H., Stephanie,**

- L., 1997.** Méthodes spectrométriques d'analyse et de caractérisation, les métaux lourds, Dossier SAM 1997. Axe " Génie des Procédés", centre SPIN, Ecole des Mines de Saint-Etienne, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 85 p
- Steube, C., S. Richter, & C. Griebler., 2009.** First attempts towards an integrative concept for the ecological assessment of groundwater ecosystems. *Hydrogeology Journal* **17**: 23–35.
- Suchel, J.B., 1972.** La Répartition des pluies et les régimes pluviométriques au Cameroun : contribution à l'étude des climats de l'Afrique tropicale. Centre d'Études de géographie tropicale 186 p
- Tachet H., Richoux P., Bournaud M. & Usseglio-Polatera P., 2010.** Invertébrés d'eau douce: systématique, biologie et écologie. CNRS édition, Paris, France, 588p.
- Tchakonte S., 2016.** Diversité et structure des peuplements de macroinvertébrés benthiques des cours d'eau urbains et périurbains de Douala (Cameroun). Thèse de Doctorat/Ph.D, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I, 232p
- Tchiadeu, G. et Ketchemen-Tandia, B., 2009.** La ville de Douala face aux changements climatiques. In Actes du Colloque de Yaoundé.
- Tchuikoua L.B., 2010.** Gestion des déchets solides ménagers à Douala au Cameroun: opportunité ou menace pour l'environnement et la population? Thèse de Doctorat en Cotutelle, Université De Douala Et Université De Bordeaux III, 254 p.
- Thienemann A., 1925.** Die Binnengewässer Mitteleuropa. In: Die Binnenge Wässer. Einzeldarstellung aus der Limnologie und ihren Nachbargebieten, n° 1, 255 p.
- Thomas Lacoue-Labarthe, 2007.** Incorporation des métaux dans les œufs de la seiche commune *Sepia officinalis* et effets potentiels sur les fonctions digestives et immunitaires. Physiologie [q-bio.TO]. Université de La Rochelle, 221p
- Tuekam Kayo R. P., 2013.** Essai de biotypologie faunistique des eaux souterraines de quelques localités des régions du Centre et Littoral du Cameroun : influence de quelques facteurs abiotiques. Thèse de Doctorat/Ph.D, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I, 291p.
- Tuekam Kayo R., Marmonier P., Boutin C., Nola M., Zébazé Togouet S.H. And Piscart C., 2012b.** Les crustacés aquatiques souterrains d'Afrique et de Madagascar: Bilan et enjeux. *Spelunca*, **128** : 43-46.
- Tuekam Kayo R., Marmonier P., Zébazé Togouet S.H., Nola M. And Piscart C., 2012a.** An annotated checklist of freshwater stygobiotic crustaceans of Africa and Madagascar. *Crustaceana*, **85**: 1613-1631.
- UNEP, 2011.** International Year of Biodiversity Website. Available at:

http://www.unep.org/iyb/About_iyb.asp. Accessed 18 Oct 2011

- Vaessen V., Brentführer R. & Bgr, 2015.** L'intégration de la gestion des eaux souterraines pour les Organismes de Bassins Transfrontaliers en Afrique - un manuel de formation produit par AGW-Net, BGR, IWMI, Cap Net, RAOB, et IGRAC. *Manuel de formation*, 20 p
- Vandel A., 1964.** *Biospéologie - La biologie des animaux cavernicoles*. Editions Gauthier-Villars, Paris, 619 p
- Vences M, Miralles A, Brouillet S, Ducasse J, Fedosov A, Kharchev V, Kostadinov I, Kumari S, Patmanidis S, Scherz Md, Puillandre N, Renner Ss., 2021.** iTaxoTools 0.1: Kickstarting a specimen based software toolkit for taxonomists. bioRxiv: 2021.03.26.435825.
- Viala A., Botta A., 2005.** Toxicologie, 2ème édition, édition Lavoisier tec and doc, 1122 p
- Vilagines R., 2003.** Eau, environnement et santé publique. Lavoisier édition Paris, 236 p
- Villanueva M.C., 2004.** Biodiversité et relations trophiques dans quelques milieux estuariens et lagunaires de l'Afrique de l'Ouest: adaptations aux pressions environnementales. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique (Toulouse), 219p.
- Waalkes M.P., 2000.** Cadmium carcinogenesis in review. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 79: 241-244.
- Wandji P., Wotchoko P., Bardintzeff J. M. & Bellon H., 2010.** Late Tertiary and Quaternary alkaline volcanism in the western Noun Plain (Cameroon Volcanic Line): New K-Ar ages, petrology and isotope data.. *Geochemistry, Mineralogy and Petrology Sofia, Bulgarian Academy of Sciences, Bulgarian Mineralogical Society* **48**: 67-94.
- Ward J. V., 1998.** Riverine landscapes: biodiversity patterns, disturbance regimes and aquatic conservation. *Biological Conservation* 83, 3: 269-278.
- Ward J., 1963.** Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of American Statistical Association*, 58: 1-236.
- WHO/UNICEF, 2012.** Progress on Drinking Water and Sanitation: 2012 Update. 13p
- Williams D. D. & Hynes H. B. N., 1974.** The occurrence of benthos deep in the substratum of a stream. *Freshwater Biology* 4: 233-256.
- Williams W., Lance G., Dale M., Clifford H., 1971.** Controversy concerning the criteria for taxonomic strategies. *Computer Journal*, 14: 1-162.
- Witterners L., Aufderheide A., Rapp G., Alich, A., 2002.** Archaeological contributions of skeletal lead analysis. *Acc. Chem. Res.* 35: 669.
- Zebaze Togouet S. H., Boutin C., Njiné T., Kemka N. & Foto Menbohan S., 2009.** First data on the groundwater quality and aquatic fauna of some wells and springs from Yaounde

- (Cameroun). *European Journal of Water Quality*, **40**: 51-74.
- Zebaze Togouet S.H., Tuekam Kayo R.P., Boutin C., Nola M. & Foto Menbohan S., 2011.** Impact de la pression anthropique sur l'eau et la faune aquatique des puits et sources de la région de Yaoundé (Cameroun, Afrique Centrale). *Bulletin de la société d'Histoire Naturelle de Toulouse*, **147** : 27–41.
- Zebaze Togouet SH., Boulanouar M., Njine T., Boutin C., 2013.** First discovery of a Stenasellidae (Crustacea, Isopoda, Aselloidea) in the ground waters of Cameroon (Central Africa): description, origin and palaeogeographic implications of *Metastenasellus camerounensis* sp. nov. *Bulletin de la Societe d'Histoire Naturelle de Toulouse* 149: 153–166.
- Zhang, ZQ., 2011.** Animal biodiversity: An outline of higher-level classification and survey of taxonomic richness. *Zootaxa*, **3148** : 1-237.
- Zogning Moffo, M.O., Tonye, E., Ambara, G. Et Maurice, T., 2010.** Cartography of Flood Prone Areas and Assessment of Flooding Housing in Douala (Cameroon), <https://www.researchgate.net/publication/273321869>, 15 p.
- Zoller, W. H., 1984.** Anthropogenic perturbation of metal fluxes into the atmosphere. In *Changing Metal Cycles and Human Health* (J. O. Nriagu, ed.) Berlin:Springer Verlag, 27–41.

ANNEXES

Annexe 1 : Corrélations r de Spearman entre les variables abiotiques et les taxa aquatiques souterrains récoltés.

Gordi=Gordiidae ; Lumbrici= Lumbricidae, Lumbricu= Lumbriculidae, Naidi= Naïdidea ; Tubif= Tubificidae ; Glossipho= Glossiphoniidae ; Lymna= Lymnaeidae ; Physi= Phisidae ; Cypridi= Cyprididae ; Cyther= Cytheridae ; Onis= Oniscidae ; Stenas= Stenasellidae ; Cyclop= Cyclopidae ; Chiro= Chironomidae ; Libellu= Libellulidae. Prof=Profondeur ; Alt= Altitude ; HM= Hateur de la margelle ; CE= Couche d'eau ; Temp= Température ; Cond.= Conductivité électrique ; Sal.= Salinité ; Alca= Alcalinité ; Oxyda= Oxydabilité ; Coul= Couleur ; Turbid= Turbidité ; DurC= Dureté Calcique ; DurM= Dureté magnésienne.

	Gordi	Lumbrici	Lumbricu	Naidi	Tubif	Glossipho	Lymna	Physi	Cypridi	Cyther	Onis	Stenas	Cyclop	Chiro	Libellu
Prof	-0,034	-0,047	-0,009	0,031	0,127	-0,113	-0,368**	-0,399**	-0,257**	0,122	-0,040	0,377**	-0,064	-0,274**	-0,132
Alt	-0,085	0,042	-0,144	-0,183	0,111	-0,040	-0,270**	-0,287**	-0,075	0,090	0,013	0,384**	-0,099	-0,161*	-0,074
HM	-0,008	-0,052	-0,015	-0,025	0,025	0,040	-0,095	-0,020	-0,214**	-0,137	-0,083	0,275**	0,019	-0,208**	-0,009
CE	-0,026	0,049	0,091	0,150	0,087	-0,020	-0,205**	-0,261**	-0,060	0,142	-0,026	0,078	-0,083	-0,063	-0,154*
Temp	0,072	-0,204**	0,078	0,136	0,014	-0,045	-0,193*	0,054	-0,202**	-0,072	0,116	-0,100	0,060	-0,195*	0,000
pH	0,005	0,012	0,132	0,087	-0,018	0,110	0,347**	0,424**	0,279**	0,207**	0,007	-0,266**	0,161*	0,179*	0,139
Cond	-0,026	-0,054	0,179*	0,153	-0,065	0,020	0,186*	0,160*	0,020	0,203**	-0,027	-0,290**	-0,020	-0,001	-0,021
TDS	-0,022	-0,051	0,194*	0,150	-0,062	0,022	0,175*	0,168*	0,034	0,204**	-0,024	-0,284**	-0,007	0,014	-0,021
Sal	-0,019	-0,058	0,167*	0,149	-0,065	0,015	0,185*	0,159*	0,020	0,199*	-0,031	-0,284**	-0,025	0,010	-0,017
O ₂	-0,047	0,088	0,060	-0,085	-0,034	-0,055	-0,135	-0,099	0,006	0,074	-0,126	0,227**	-0,016	-0,102	-0,163*
CO ₂	0,058	0,026	0,119	0,069	-0,011	0,009	-0,039	-0,034	-0,033	0,074	0,007	-0,303**	0,027	-0,037	-0,076
Alca	-0,045	0,067	-0,008	0,046	-0,079	-0,094	0,143	0,112	0,070	-0,006	-0,066	-0,018	-0,101	0,197*	-0,050
Oxyda	-0,021	-0,057	0,080	-0,021	0,053	0,095	0,202**	0,012	-0,013	0,072	-0,016	-0,021	0,053	-0,048	-0,019
Coul	0,006	-0,181*	0,053	0,055	-0,013	0,010	0,199*	0,094	-0,093	-0,007	-0,080	-0,152	0,198*	-0,034	-0,002
MES	0,016	0,098	0,027	-0,054	-0,029	0,131	0,157*	0,059	-0,102	0,071	-0,066	-0,191*	0,194*	-0,068	0,049
Turbid	-0,073	-0,057	0,066	0,000	-0,099	0,014	0,198*	0,110	-0,029	0,024	-0,065	-0,191*	0,150	-0,021	-0,037
NO ₂	0,038	0,115	0,172*	0,145	-0,085	0,130	0,152	0,206**	0,003	0,107	0,027	-0,331**	0,061	0,156*	0,046
NO ₃	0,074	-0,127	0,158*	0,178*	-0,003	-0,019	-0,060	-0,089	-0,136	0,034	-0,073	-0,093	0,083	-0,121	-0,051
PO ₄	-0,185*	-0,122	-0,117	-0,022	0,077	0,103	0,028	0,075	-0,124	0,040	-0,062	0,010	0,014	-0,181*	0,113
NH ₄	-0,156*	0,086	0,057	-0,057	-0,026	0,069	0,163*	0,076	0,039	-0,056	-0,067	-0,169*	0,101	0,007	-0,043
DCO	0,054	-0,001	-0,003	0,141	-0,073	0,020	0,285**	0,154*	0,020	0,084	-0,098	-0,094	-0,055	0,241**	-0,075
DBO ₅	0,018	-0,065	0,142	0,082	0,197*	0,029	-0,097	0,129	0,011	-0,019	0,099	-0,134	0,105	0,020	-0,199*
DurC	-0,050	-0,077	0,052	-0,018	-0,165*	-0,135	0,002	0,093	-0,158*	0,044	0,071	0,025	-0,054	0,009	0,111
DurM	-0,010	0,125	-0,053	0,029	0,089	0,026	-0,144	-0,021	-0,084	-0,060	0,014	0,080	-0,079	0,064	-0,019
K	0,107	-0,011	0,106	0,051	-0,054	0,012	0,107	0,090	-0,082	-0,165*	-0,094	-0,187*	0,031	-0,003	-0,085
Na	-0,051	-0,010	0,008	-0,005	-0,059	-0,002	0,032	0,133	-0,070	0,075	0,058	-0,160*	-0,037	-0,112	0,026
Mg	-0,169*	-0,015	-0,127	-0,129	0,015	-0,104	-0,134	-0,151	-0,111	-0,045	-0,048	0,192*	-0,192*	-0,179*	-0,059
Ca	-0,031	-0,039	0,048	0,009	-0,131	-0,080	0,128	0,088	-0,037	-0,081	0,025	-0,147	0,053	0,112	0,000
Ba	-0,145	0,009	-0,250**	-0,154*	-0,052	0,034	0,007	0,181*	0,176*	-0,052	0,084	0,067	-0,032	0,070	-0,040
Zn	-0,014	0,049	0,029	0,025	-0,147	0,153	0,120	0,253**	0,042	0,030	-0,003	-0,345**	0,035	0,131	0,152
Cd	0,014	-0,129	0,063	0,057	-0,188*	-0,001	0,173*	0,210**	0,057	-0,056	-0,068	-0,216**	0,164*	0,111	-0,017
Sn	0,097	-0,138	-0,072	-0,077	-0,089	-0,089	0,163*	0,196*	-0,053	-0,059	-0,020	-0,008	0,077	0,055	-0,140
Pb	0,056	-0,063	0,156*	0,139	0,007	0,034	0,078	0,235**	-0,015	-0,011	-0,063	-0,273**	0,198*	0,109	-0,070
Po	0,023	0,140	-0,068	0,046	-0,045	0,149	-0,037	0,131	0,019	-0,004	0,043	-0,242**	0,004	0,058	0,162*
Cu	-0,084	-0,004	0,014	0,012	-0,165*	-0,020	0,064	-0,044	0,132	-0,084	0,128	-0,329**	-0,093	0,196*	-0,046
Cr	0,100	-0,005	0,121	0,206**	-0,015	-0,016	0,006	0,087	0,083	0,077	0,094	-0,319**	0,007	0,159*	-0,081
Mn	0,008	-0,038	0,095	0,049	-0,082	0,089	0,195*	0,334**	0,254**	-0,057	-0,096	-0,297**	-0,014	0,121	0,102
Fe	0,028	-0,022	-0,006	-0,111	-0,167*	0,074	0,312**	0,150	-0,006	-0,026	-0,041	-0,335**	-0,014	0,187*	0,040
Co	0,113	-0,120	0,164*	0,097	-0,038	-0,075	0,176*	0,034	0,112	0,124	0,048	-0,353**	0,132	0,103	-0,119
Ni	0,133	-0,073	0,128	0,076	-0,133	0,020	0,179*	0,107	-0,033	-0,163*	-0,002	-0,298**	0,013	0,112	0,000
B	0,127	-0,115	0,200*	0,080	-0,057	-0,031	0,192*	0,035	0,002	0,055	-0,005	-0,173*	0,061	-0,005	-0,043
Si	0,155*	-0,197*	0,208**	0,129	-0,056	0,014	0,151	0,130	-0,075	-0,027	-0,061	-0,041	0,088	-0,072	0,004
As	0,117	-0,086	0,134	0,128	-0,121	0,072	0,300**	0,345**	0,068	0,008	0,052	-0,150	0,157*	0,195*	-0,004
Sb	0,078	-0,086	0,080	0,148	-0,057	0,023	0,143	0,081	0,065	0,093	-0,091	-0,213**	0,016	0,038	-0,088

* = Corrélacion significative à 0,05 ; ** =Corrélacion significative à 0,01

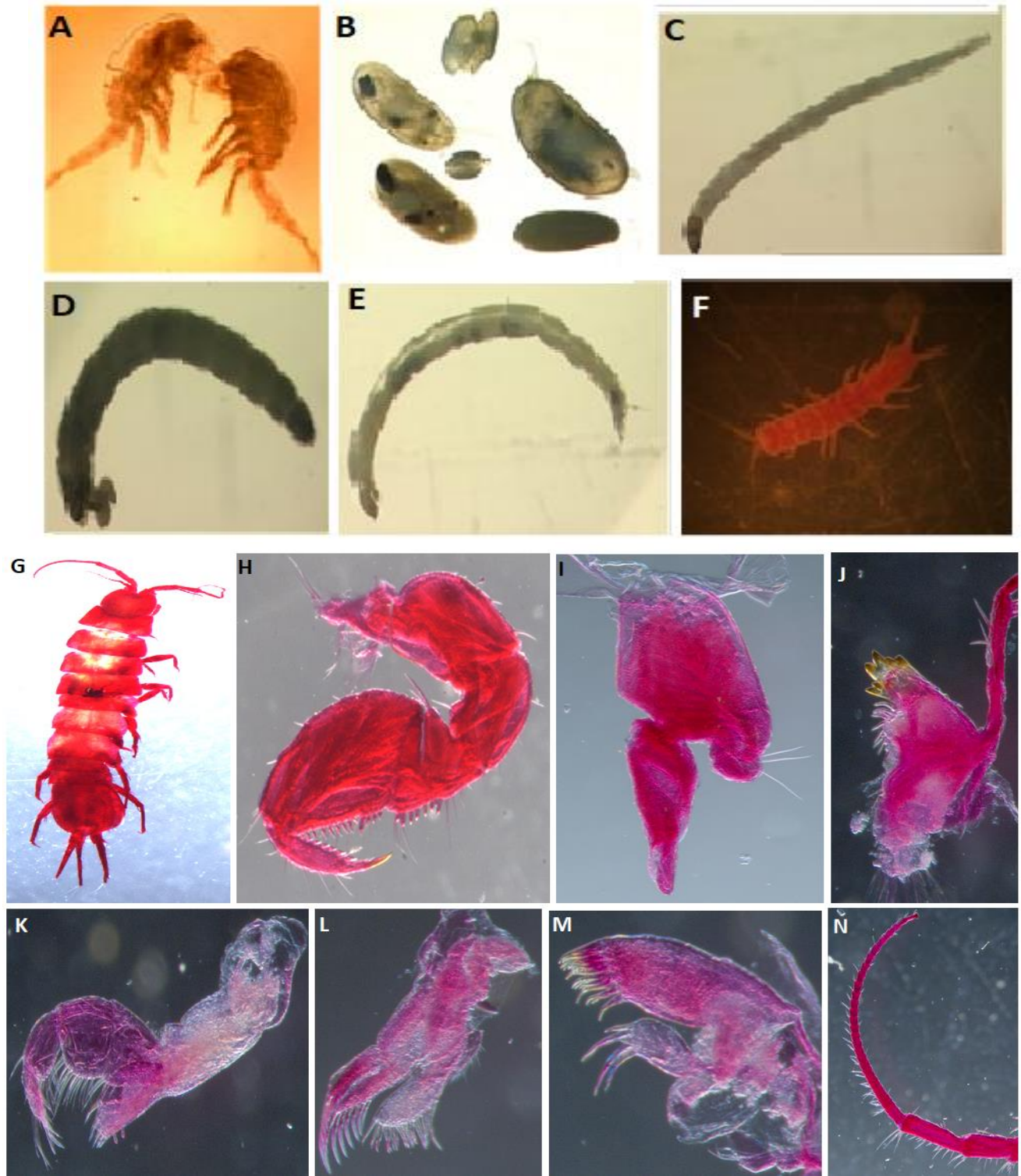
Annexe 1 (Suite et fin) : Corrélations r de Spearman entre les variables abiotiques et les taxa aquatiques souterrains récoltés

Gomphi= Gomphidae ; Psycho= Psychodidae ; Cerato= Ceratopogonidae ; Elmi= Elmidae ; Formi= Formicidae ; Dytis= Dityscidae ; Cordul= Cordulidae ; Isoto= Isotomidae ; Culici= Culicidae ; Hydrophilidae ; Hygro= Hygrobiidae ; Hydra= Hydracarinae ; Stratio= Stratiomyidae Dryop= Dryopidae ; Ptycho= Ptychopteridae ; Alt= Altitude ; HM= Hateur de la margelle ; CE= Couche d'eau ; Temp= Température ; Cond.= Conductivité électrique ; Sal.= Salinité ; Alca= Alcalinité ; Oxyda= Oxydabilité ; Coul= Couleur ; Turbid= Turbidité ; DurC= Dureté Calcique ; DurM= Dureté magnésienne.

	Gomphi	Psycho	Cerato	Elmi	Formi	Dytis	Cordul	Isoto	Culici	Hydrop	Hygro	Hydra	Stratio	Dryop	Ptycho
Prof	-0,129	-0,132	0,005	-0,087	0,087	-0,087	0,028	-0,085	0,047	-0,024	-0,050	-0,066	-0,146	-0,077	-0,077
Alt	-0,169*	-0,139	0,027	-0,066	0,118	-0,066	-0,045	-0,112	0,101	-0,143	-0,119	-0,065	-0,126	-0,111	-0,111
HM	-0,056	-0,153	-0,084	0,000	-0,046	0,000	0,040	0,054	-0,046	-0,014	0,023	-0,101	-0,085	-0,072	-0,072
CE	-0,107	0,087	0,067	-0,056	-0,104	-0,133	-0,014	0,001	-0,021	0,030	-0,053	-0,137	-0,005	0,002	0,002
Temp	0,001	-0,050	0,029	0,024	0,008	0,067	0,001	0,063	0,017	-0,013	0,064	0,039	0,107	-0,007	-0,007
pH	-0,027	0,106	-0,014	0,004	-0,268**	0,030	0,003	-0,110	-0,012	-0,015	0,024	-0,062	0,069	-0,011	-0,011
Cond	-0,020	0,199*	0,319**	0,002	-0,229**	0,005	0,148	0,020	0,026	0,026	0,062	0,083	0,092	0,103	0,103
TDS	-0,018	0,204**	0,325**	0,004	-0,223**	0,008	0,150	0,022	0,029	0,029	0,062	0,082	0,094	0,103	0,103
Sal	-0,019	0,192*	0,318**	-0,003	-0,220**	0,000	0,147	0,022	0,026	0,023	0,059	0,086	0,084	0,100	0,100
O ₂	-0,097	0,034	0,043	-0,080	-0,069	-0,103	0,015	0,001	0,057	-0,001	-0,052	-0,007	-0,099	-0,019	-0,019
CO ₂	0,027	0,090	0,104	0,063	-0,173*	0,072	0,118	-0,011	0,029	0,121	0,068	-0,021	0,198*	0,144	0,144
Alca	-0,086	0,091	0,146	-0,005	-0,241**	-0,049	0,118	0,078	0,023	0,077	-0,003	-0,011	-0,010	0,080	0,080
Oxyda	-0,004	0,138	0,063	0,086	-0,004	-0,024	0,058	-0,030	0,082	0,043	0,088	-0,057	0,079	0,062	0,062
Coul	-0,003	-0,067	-0,063	0,090	-0,020	0,057	0,137	0,026	-0,056	0,070	0,111	0,102	-0,019	-0,003	-0,003
MES	0,004	0,079	-0,045	0,163*	0,021	0,112	0,022	0,026	0,019	0,062	0,128	0,062	0,115	0,128	0,128
Turbid	0,009	0,039	-0,002	0,135	-0,036	0,111	0,081	0,107	-0,039	0,057	0,121	0,034	0,063	0,111	0,111
NO ₂	0,023	0,147	0,230**	0,043	-0,107	-0,005	0,177*	-0,043	-0,069	0,023	0,065	0,092	0,143	0,141	0,141
NO ₃	0,035	0,094	0,189*	0,120	0,097	0,060	0,128	0,008	-0,007	0,054	0,109	0,130	0,182*	0,116	0,116
PO ₄	0,115	-0,170*	-0,060	0,023	0,047	0,056	0,004	-0,011	0,031	0,118	0,105	0,069	0,016	0,063	0,063
NH ₄	0,021	0,045	-0,022	0,159*	0,059	0,021	0,052	-0,061	-0,010	0,001	0,124	-0,012	0,117	0,121	0,121
DCO	-0,013	0,055	0,077	-0,069	-0,138	-0,069	0,107	0,030	0,039	0,057	-0,013	0,014	0,046	0,076	0,076
DBO ₅	-0,136	-0,007	-0,006	0,026	0,105	-0,056	0,041	-0,008	-0,065	-0,036	-0,096	0,053	-0,103	-0,136	-0,136
DurC	0,087	0,051	0,027	0,127	0,052	0,176*	0,039	0,002	-0,137	0,090	0,123	-0,012	0,068	0,079	0,079
DurM	-0,004	0,010	0,137	0,004	0,150	-0,019	-0,051	-0,093	0,146	-0,093	-0,103	-0,100	0,022	-0,008	-0,008
K	-0,075	-0,014	-0,047	-0,089	-0,114	-0,089	-0,049	-0,004	-0,119	0,052	-0,020	-0,046	0,180*	0,078	0,078
Na	0,017	0,047	-0,001	0,043	-0,076	0,043	-0,065	0,056	0,028	0,024	0,061	-0,091	0,224**	0,138	0,138
Mg	0,004	-0,057	-0,059	-0,113	0,162*	-0,113	-0,056	0,083	-0,120	-0,123	-0,104	0,018	0,046	-0,006	-0,006
Ca	-0,085	0,065	-0,015	-0,097	-0,038	-0,097	-0,096	0,086	-0,160*	0,011	-0,108	-0,028	0,107	-0,045	-0,045
Ba	-0,002	-0,161*	-0,038	-0,060	-0,004	-0,060	-0,008	-0,111	0,156*	-0,120	-0,091	-0,187*	-0,103	-0,079	-0,079
Zn	-0,019	0,102	0,196*	0,095	-0,166*	0,095	0,077	0,061	0,040	0,062	0,051	0,015	0,206**	0,124	0,124
Cd	0,012	0,144	-0,043	0,033	-0,100	0,033	-0,052	0,094	-0,034	0,143	0,084	0,048	0,204**	0,082	0,082
Sn	-0,003	-0,015	0,007	-0,003	-0,124	-0,003	0,107	0,104	-0,075	0,153	0,091	0,065	0,151	0,069	0,069
Pb	0,011	0,140	0,135	0,011	-0,143	0,011	0,087	0,109	-0,056	0,103	0,078	0,038	0,056	0,036	0,036
Po	0,047	-0,019	0,020	0,047	-0,051	0,047	-0,032	-0,039	-0,027	0,095	0,008	-0,097	0,089	0,069	0,069
Cu	0,042	0,167*	0,269**	0,020	-0,193*	0,020	0,054	0,143	-0,124	-0,014	0,008	0,080	0,068	-0,007	-0,007
Cr	0,072	0,103	0,038	0,016	-0,103	0,016	0,072	0,022	-0,007	0,072	0,050	-0,021	0,116	0,123	0,123
Mn	0,050	0,154*	0,104	0,154*	-0,125	0,154*	0,101	0,037	-0,030	-0,004	0,089	0,003	0,015	0,053	0,053
Fe	0,130	0,075	0,103	0,106	-0,065	0,106	0,042	0,135	-0,055	0,115	0,071	0,132	0,121	0,061	0,061
Co	0,071	0,059	0,066	0,127	-0,168*	0,127	-0,023	0,120	0,011	0,120	0,065	0,040	0,121	0,078	0,078
Ni	0,101	0,080	0,091	0,068	-0,103	0,068	0,047	0,123	-0,135	0,092	0,045	0,071	0,103	0,054	0,054
B	0,016	0,175*	0,109	0,133	-0,131	0,133	0,000	0,112	-0,005	0,163*	0,128	0,009	0,109	0,016	0,016
Si	0,036	0,036	-0,057	0,141	-0,122	0,141	0,003	0,089	0,002	0,146	0,118	0,026	0,100	0,044	0,044
As	0,084	0,007	-0,116	0,067	-0,195*	0,067	0,021	-0,117	-0,042	0,105	0,106	-0,071	0,059	0,028	0,028
Sb	-0,003	0,025	0,096	-0,003	-0,243**	-0,003	0,155*	0,107	0,012	0,112	0,086	0,036	0,070	-0,003	-0,003

* = Corrélacion significative à 0,05 ; ** =Corrélacion significative à 0,01

Annexe 2 : Quelques invertébrés souterrains des eaux de Douala obtenus au cours de l'étude.
(© POUNTOUGNIGNI O. F.)



Légende :

A = Cylopidae B = Cyprididae C = Ceratopogonidae D, E = Chironomidae F = Stenasellidae
G - N : *Metastenasellus boutini* : G = Habitus ; H = Périopode 1 ; I = Pléopode 2 ♂ ;
J = Mandibule ; K = Maxillipède ; L = Maxille 1 ; M = Maxille 2 ; N = Antenne 1

PUBLICATION ISSUE DE LA THÈSE

POUNTOUGNIGNI O. F., PISCART C., SOB NANGOU P. B., ZEBAZE TOUGOUET S. H. (2021). Distribution of Stenasellidae in Africa and description of a new species of *Metastenasellus* from Cameroonian groundwaters. *Subterranean Biology* 40: 175–194. <https://doi.org/10.3897/subtbiol.40.76301>

LISTE DES COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES ISSUES DES TRAVAUX DE LA THÈSE ET PRÉSENTÉES AUX CONFÉRENCES NATIONALES ET INTERNATIONALES

1. Participation (en ligne) au Sommet de l'ONU sur les eaux souterraines. Du 6 au 8 décembre 2022, Paris (France) ;
2. Participation à la 28^{ème} Conférence annuelle des Biosciences. Du 30 novembre au 4 décembre 2021, Dschang (Cameroun) ;
3. Participation au 2^e Regroupement de la 2^e cohorte du Collège Doctoral Régional MATHINBIO à l'Université Catholique d'Afrique Centrale (UCAC, Campus d'Ekounou) dans le cadre de la bourse AUF. Du 6 au 10 décembre 2021, Yaoundé (Cameroun) ;
4. Participation au 1^{er} Regroupement de la 2^e cohorte du Collège Doctoral Régional MATHINBIO à l'Université Catholique d'Afrique Centrale (UCAC, Campus de Nkolbisson) dans le cadre de la bourse AUF. Du 30 Octobre au 04 Novembre 2020, Yaoundé (Cameroun).

Distribution of Stenasellidae in Africa and description of a new species of *Metastenasellus* from Cameroonian groundwaters

Pountounigni Oumarou Farikou¹, Piscart Christophe²,
Sob Nangou Paul Bertrand¹, Zebaze Togouet Serge Hubert¹

1 University of Yaounde 1, Laboratory of Hydrobiology and Environment BP: 812, Yaoundé, Cameroon

2 Univ Rennes, CNRS, ECOBIO – UMR 6553, F-35000, Rennes, France

Corresponding author: Piscart Christophe (christophe.piscart@univ-rennes1.fr)

Academic editor: Damia Jaume | Received 8 October 2021 | Accepted 22 November 2021 | Published 3 December 2021

<http://zoobank.org/96E9F621-B1A9-43DB-B18B-34983DD72B4B>

Citation: Farikou PO, Christophe P, Bertrand SNP, Hubert ZTS (2021) Distribution of Stenasellidae in Africa and description of a new species of *Metastenasellus* from Cameroonian groundwaters. *Subterranean Biology* 40: 175–194. <https://doi.org/10.3897/subtbiol.40.76301>

Abstract

During recent investigations of the groundwater fauna of Cameroon, specimens of a new species of the stygobitic genus *Metastenasellus*, *M. boutini* sp. nov. were collected in wells of the city of Douala. The new species can be easily distinguished from the other species of the genus by its relatively large size (up to 11 mm), pleonite 1 and 2 half the length of pereonite 7, the shape of pleopod 2 in males (presence of an external lobe on the protopodite, distal part of the spermatid duct slightly protruding out of the second article, lack of a distal seta on the exopodite), and uropod half the length of the pleotelson. Ecological data and a key to *Metastenasellus* species are provided. We also performed an exhaustive analysis of the literature on Stenasellidae in Africa to study the geographical distribution of the family in this continent and discuss some hypotheses about the origin of African species.

Keywords

biogeography, integrative taxonomy, Isopoda, stygofauna, tropical Africa

Introduction

Over the last decades, investigations of groundwaters around the world have highlighted an unexpectedly high diversity of organisms forming the so-called stygobitic fauna. Stygobitic diversity even exceeds epigeal diversity for some groups (Stoch 1995; Sket 1999; Gibert and Culver 2009). This is particularly the case for freshwater crustaceans; for instance, 38% of known freshwater species in Europe live only in groundwaters (Sket 1999). Despite important progress in our knowledge of groundwater biodiversity, data from the different parts of the world are still heterogeneous, with very poorly known regions (Gibert and Culver 2009). This is particularly true for continental Africa, where data about the diversity and distribution of the stygobites are scarce (Tuekam Kayo et al. 2012) and mainly reported in a few taxonomic papers.

Among the stygobitic species living in Africa, the order Isopoda, with at least 80 species, represents around 30% of the total number of groundwater species of the continent (Tuekam Kayo et al. 2012). African subterranean Isopod species belong to 7 families (Asellidae, Cirolanidae, Lepidocharontidae, Microcerberidae, Microparasellidae, Protojaniridae, and Stenasellidae). Stenasellidae harbors the highest number of species, with 23 currently known species distributed into 6 genera.

In this context, the goal of our study was to complete existing knowledge on the diversity and distribution of stenasellid isopods in Africa. We performed extensive sampling campaigns in Central Africa, in particular in Cameroon, starting in 2010. These campaigns revealed the presence of a new species, *Metastenasellus camerounensis* Zebaze Togouet, Boulanouar, Njiné & Boutin 2013 – but also of several other new species of *Metastenasellus* in Cameroon (Tuekam Kayo et al. 2012; Nana Nkemegni et al. 2015) and Benin (Eme et al. 2018) that remained undescribed. During surveys in southwestern Cameroon, a new species of *Metastenasellus* was found in wells near Douala. In this study, we describe this new species using morphological and molecular techniques and its ecology, we propose an identification key to all species of the genus *Metastenasellus*, and we summarize the published literature on the distribution of Stenasellidae in Africa.

Materials and methods

Study sites and faunal sampling

Between 2019 and 2021, 5 sampling campaigns (3 during the rainy season and 2 during the dry season) were carried out in 41 wells in the city of Douala. The wells were located in alluvial sediments near the Atlantic coast (maximum distance from the ocean 16 km) with an elevation lower than 65 m a.s.l., and a maximum depth of 9 m. The city of Douala has warm and humid climate conditions, with an average annual temperature of 27.0 °C and an average humidity level of 83%, with around 4,000 mm of precipitation *per* year (Olivry 1986). The dry season extends from December to February and a long rainy season extends from March to November.

Faunal samples were collected from the bottom of the wells using a modified phreatic net sampler (30 cm diameter aperture and 64 μm mesh size: Cvetkov 1968).

Water samples were collected in each well at each sampling date. Temperature, pH, electrical conductivity, and dissolved oxygen were measured directly in the field with a mercury thermometer, a portable pH-meter (CG 818, Schott instruments), and a portable conductivity meter and optical dissolved oxygen meter (HQ30d, Hach Lange), respectively. The water was transported directly to the laboratory using polyethylene bottles under cool storage for additional analyses: alkalinity, dissolved carbon dioxide, calcium, magnesium, chemical (CDO) and biological (BDO5) oxygen demand, turbidity, and nutrient contents. The differences in physico-chemical parameters of water in wells with or without the new species were assessed using non-parametric Mann-Whitney U Tests using the STATISTICA v12 (StatSoft) software.

Morphological study

The specimens were dissected and mounted on microscopic slides in Faure's mounting medium, after maceration +in lactic acid and staining with pink lignin. Body parts were digitally drawn using a Wacom tablet and the Adobe Illustrator software package (Adobe).

Molecular analysis

Total genomic DNA was extracted from a part of an animal using NucleoSpin Tissue Kits (Machery-Nagel) following the manufacturer's instructions (Düren, Germany). A fragment of the mitochondrial COI gene was amplified using LCO1490/HCO2198 (Folmer et al. 1994) and UCOIR/UCOIF (Costa et al. 2009) primers. Touchdown Polymerase chain reactions (TD PCRs) (Korbie and Mattick 2008) were performed in a final volume of 27 μl containing 12 μl of water, 10.5 μl of Type-it PCR Master Mix (Qiagen, Germany), and 1.8 μl of each primer (5 μM). A denaturation step at 95 °C for 5 minutes was followed by 35 cycles (30 seconds at 95 °C, 90 seconds at each temperature and 30 seconds at 72 °C), with a final extension step of 30 minutes at 70 °C. TD-PCRs are characterized by an initial annealing temperature (55 °C in our study) above the projected melting temperature (T_m) of the primers, and then progressive transitions to a lower, more permissive annealing temperature over the course of the successive cycles (-0.5 °C per cycle during the first 8 cycles). The next 27 cycles were performed at 51 °C.

The PCR results were checked by gel electrophoresis, then the PCR products were purified and sequenced in both directions by the Eurofins sequencing facility or with an Applied Biosystem 3130 XL sequencer in the DNA sequencing facility of the Institute of Genetics and Development of the University of Rennes (<https://igdr.univ-rennes1.fr/en>). All COI sequences obtained in four wells are deposited on Genbank (accession numbers [OL514108](#); [OL514109](#); [OL514110](#); [OL514111](#) and [OL51412](#)) and on the Barcode of Life Data systems (BOLD) (BOLD process id: [METAF001-21](#), [METAF002-21](#), [METAF003-21](#), [METAF004-21](#) and [METAF005-21](#)).

The new COI sequences were supplemented by COI sequences downloaded from Genbank: two sequences of *Metastenasellus* species from Benin (accession numbers KY623773.1 and KY623774.1); four from *M. camerounensis* from Cameroon (accession numbers KY623769.1; KY623770.1; KY623771.1; KY623772.1), and two from an unknown *Metastenasellus* species from Cameroon (accession numbers KY623775.1; KY623776.1). All sequences were aligned with the MUSCLE algorithm (Edgar 2004) implemented in SEAVIEW ver. 5 (Gouy et al. 2021) to explore the *Metastenasellus* species diversity using different species delimitation methods implemented in iTAX-TOOLS 0.1 (Vences et al. 2021). Firstly, according to distance-based methodologies: the Assemble Species by Automatic Partitioning (ASAP) (Puillandre et al. 2021) and the distance-based Automatic Barcode Gap Discovery (ABGD) (Puillandre et al. 2012). Secondly, the results of the genetic distance-based species delimitation were cross-validated with the phylogenetic tree-based delimitation methods, namely: Generalized Mixed Yule Coalescent (GMYC) (Pons et al. 2006) and multi-rate Poisson tree processes (mPTP) (Kapli et al. 2017). For tree-based species delimitation methods, we built a phylogenetic tree under a maximum likelihood framework (ML) using PhyML v3.1 algorithm (Guindon et al. 2010) implemented in SEAVIEW ver. 5 (Gouy et al. 2021). For the tree, we used HKY85+I model, selected as the best-fit model of evolution with jModelTest 2 (Darriba et al. 2012).

For final visualization with already sequenced species of *Metastenasellus*, the neighbor-joining tree of all COI sequences, using the Kimura two-parameter (K2P) model of evolution (Kimura 1980) with 1000 bootstrap replicates, was created in SEAVIEW ver. 5 (Gouy et al. 2021).

Distribution of Stenasellidae in Africa

An exhaustive survey of the literature on Stenasellidae (species descriptions, identification keys, monography, PhD theses, books, papers) was carried out for all the species known in continental Africa. All maps were drawn with Arcgis Desktop 10.4 software (Esri) and using GIS data available on DIVA website (<http://www.diva-gis.org>) in WGS 84 datum.

Results

Species description

Order Isopoda Latreille, 1817

Suborder Asellota Latreille, 1802

Superfamily Aselloidea Latreille, 1802

Family Stenasellidae Dudich, 1924

Genus *Metastenasellus* Magniez, 1966

***Metastenasellus boutini* Pountounigni, Piscart & Zebaze Togouet, sp. nov.**

<http://zoobank.org/B56F7FB4-8AE2-4B9A-8B26-8F4FDDF0E327>

Diagnosis. *Metastenasellus boutini* n.sp. is characterized by pleonites 1 and 2 around 50% as long as pereonite 7, the presence of sternal spine on each dactylus of pereopods 2–7 and endopodite of pleopod 2 in males long and large with a helicoidal spermatid duct.

Material examined. Type-specimen: *Holotype* ♂ (9.8 mm), mounted on 2 slides and deposited at the Muséum national d'Histoire Naturelle de Paris (MNHN, France) under voucher number MNHN IU-2021-1818.

Type-locality. Cameroon, in PK21 quarter, Douala city, 04°07'16"N; 09°49'41.4"E, in a well at 60 m a.s.l. and 8 m depth, 24 April 2021. **Paratypes:** 5 ♂♂ in vials; same data as for holotype; MNHN IU-2021-1819 • 3 ♀♀ in vials; same data as for holotype; MNHN IU-2021-1820.

Other material examined. 22 specimens collected in seven wells around the type locality (Table 1).

Etymology. The epithet *boutini* refers to the name of Dr. Claude Boutin who initiated many studies on stygofauna in northern and central Africa.

Description of male. *M. boutini* sp. nov. is a relatively medium-sized stenasellid, length up to 11 mm in males. Cephalon short and rounded with a concave rostral margin and convex distally. Pereonites 1 to 7 well developed, the 6th and 7th being the longest. Pleonites 1 and 2 free and as long as 50% of the length of the pereonite 7. Pleotelson subrectangular with a pointed caudal margin and partially covering the protopodite of the uropod.

Antenna 1 (Fig. 1B) slightly longer than peduncle of antenna 2, flagellum with 12–15 articles, the last 6 bearing a single distal aesthetasc (*lamina olfactoria*), the first two articles of the peduncle are longer than the others and bear one and two sensory plumose setae, respectively. Antenna 2 (Fig. 1C) around 30% of body length, 2.5 times as long as antenna 1, flagellum composed of a variable number of short articles (32 to 48 articles for specimens between 9 and 10 mm), peduncle articles 5 and 6 bearing one and two sensory setae, respectively; exopodite vestigial (*squama*) and scale-like on posterior margin of article 3 with a spine and a long simple seta on the apex. Mandibles asymmetrical, incisor processes with four teeth; left mandible (Fig. 1D) with a well-developed *lacinia mobilis* with four teeth, followed by a row of 18 serrate setae and 12 toothed setae; right mandible (Fig. 1E) with a shorter four-toothed *lacinia mobilis* followed by a row of 18 serrate setae and 12 toothed setae; palp tri-articulated, the first article with one long simple distal seta, the second with two simple setae and ten single sided serrated setae, the last article has 12 single sided serrated setae, the two terminal ones being longer. Maxilla 1 (Fig. 1F) endite clearly separated from exite with two groups of ciliated setae at the apex separated by one simple seta and four setules on external margin; exite with 12 apical serrated setae with one to six teeth and one ciliated seta. Maxilla 2 sympod (Fig. 1G) bearing on its medial margin 7 simple setae and one strong seta; endite with 14 ciliated setae at the apex, middle lobe with 7 ciliated setae and external exite with 5

Table 1. Location of wells sampled in the quarter PK21 of Douala.

Wells	Latitude, Longitude	<i>M. boutini</i>
P1	4.124111, 9.826861	Yes
P2	4.124083, 9.827056	No
P3	4.121444, 9.828333	Yes
P4	4.121111, 9.828167	Yes
P5	4.120694, 9.827278	Yes
P6	4.120639, 9.826028	No
P7	4.119528, 9.826389	Yes
P8	4.119056, 9.826528	No
P9	4.118778, 9.827111	Yes
P10	4.119083, 9.825917	Yes

ciliated setae. Maxilliped (Fig. 1H) endite bearing 4 plumose setae, 3 serrated setae, and a pair of coupling hooks on medial margin; palp 5-articulated, articles 2 and 3 distinctly longer and stronger than the other three, articles 1–5 bearing from base to apex 4, 9, 14, 14 and 2 simple setae on medial margin, article 4 with one additional simple seta on its external margin, article 5 with 10 apical simple setae.

Gnathopod (pereopod 1) (Fig. 2A) short, powerful, and haptorial with a dense chaetotaxis and strongly armed on the ventral margin of the last four articles; basis with 8 short setae on the ventral margin; ischium subtrapezoidal and bearing two setae on each margin; merus and carpus subtriangular, bearing on the ventral margin 5 and 6 long setae, 2 and 7 pen-like setae, respectively, merus bearing 2 additional long and strong setae on its outer tip; propodus enlarged with simple setae alternating with 9 toothed setae and 4 strong proximal denticulated setae; dactylus armed with 7 toothed setae and few simple setae on its ventral margin and 8–10 simple setae on the dorsal margin.

Pereopods 2 to 7 (Fig. 2B–D; Fig. 3) typically ambulatory, slender, and rather long, with a more or less developed chaetotaxis and a similar morphology with sensorial setae on dorsal margin of the basis, a strong armature of all articles with spines of various sizes and few setae, one strong sternal spine on each dactylus; pereopod 2 (Fig. 2B) and 6 (Fig. 3B) also bearing a sensorial seta on the distal part of dorsal margin of the propodus and carpus, respectively.

Pleopod 1 (Fig. 4A) uniramous; propodus subrectangular and convex on its external margin, glabrous and without retinacula; exopodite oval, 2.5 times as long as wide with 17 distal setae, the 5 medial ones being the longest. Pleopod 2 (Fig. 4B) biramous, rami clearly separated; protopodite subpentagonal with an oblique distal part and a developed process on the external margin, slightly overreaching the first segment of the exopodite; endopodite biarticulated, proximal article not clearly delimited and ankylosed to the second one, second article highly developed, fusiform and twisted, containing a helicoidal spermatid channel with a large proximal-internal afferent opening and a smaller distal efferent orifice, surrounded by chitinous teeth; exopodite, narrower than endopodite, biarticulate with a rounded second article, larger than the first article with one subterminal seta and 2 or 3 marginal external

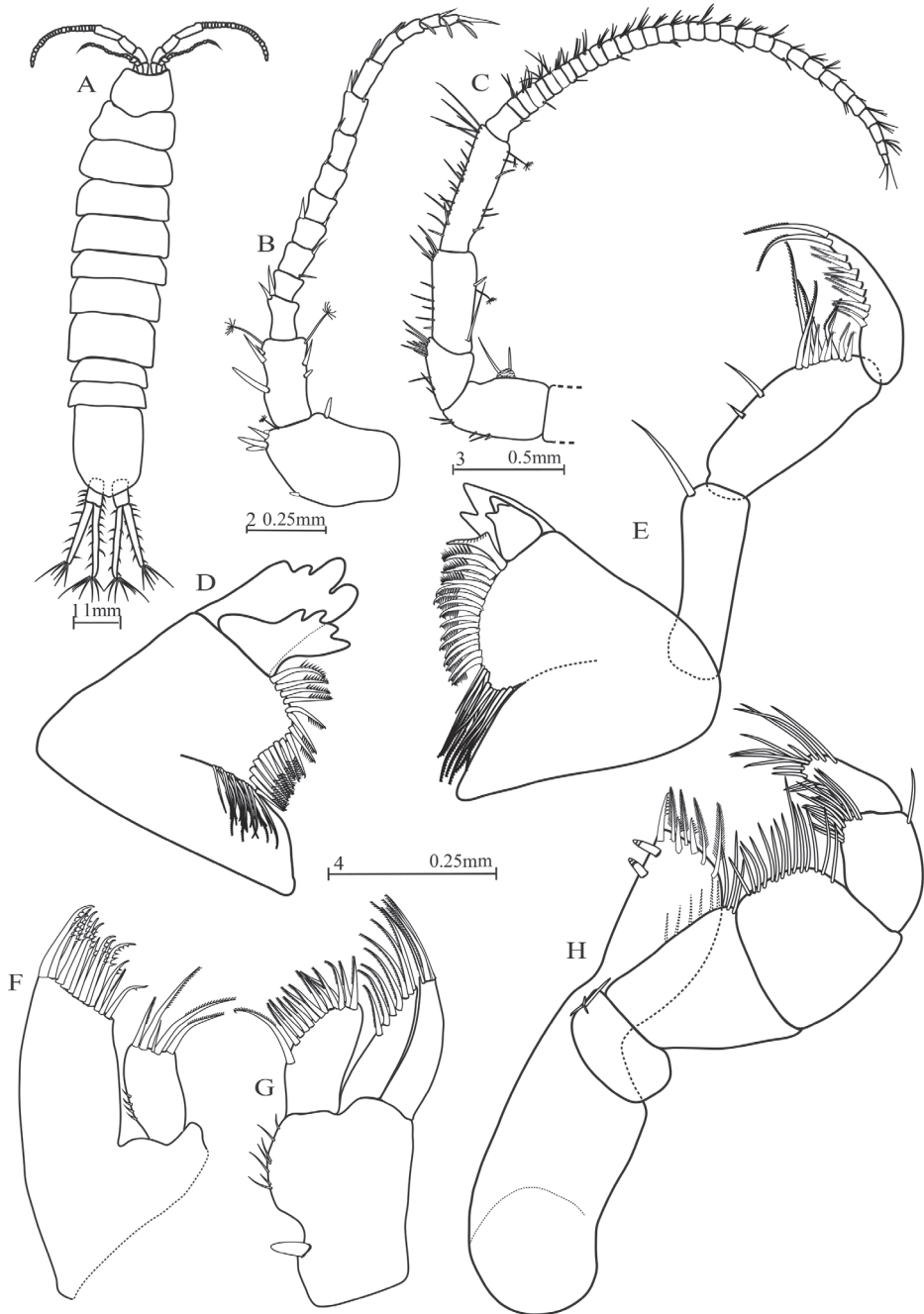


Figure 1. *Metastenasellus boutini* sp. nov., ((A–H), ♂ holotype 9.8 mm) (A) habitus (scale 1) (B) antenna 1 (scale 2) (C) antenna 2 (scale 3) (D) left mandible (scale 4) (E) right mandible (scale 4) (F) maxilla 1 (scale 4) (G) maxilla 2 (scale 4) (H) maxilliped (scale 4).

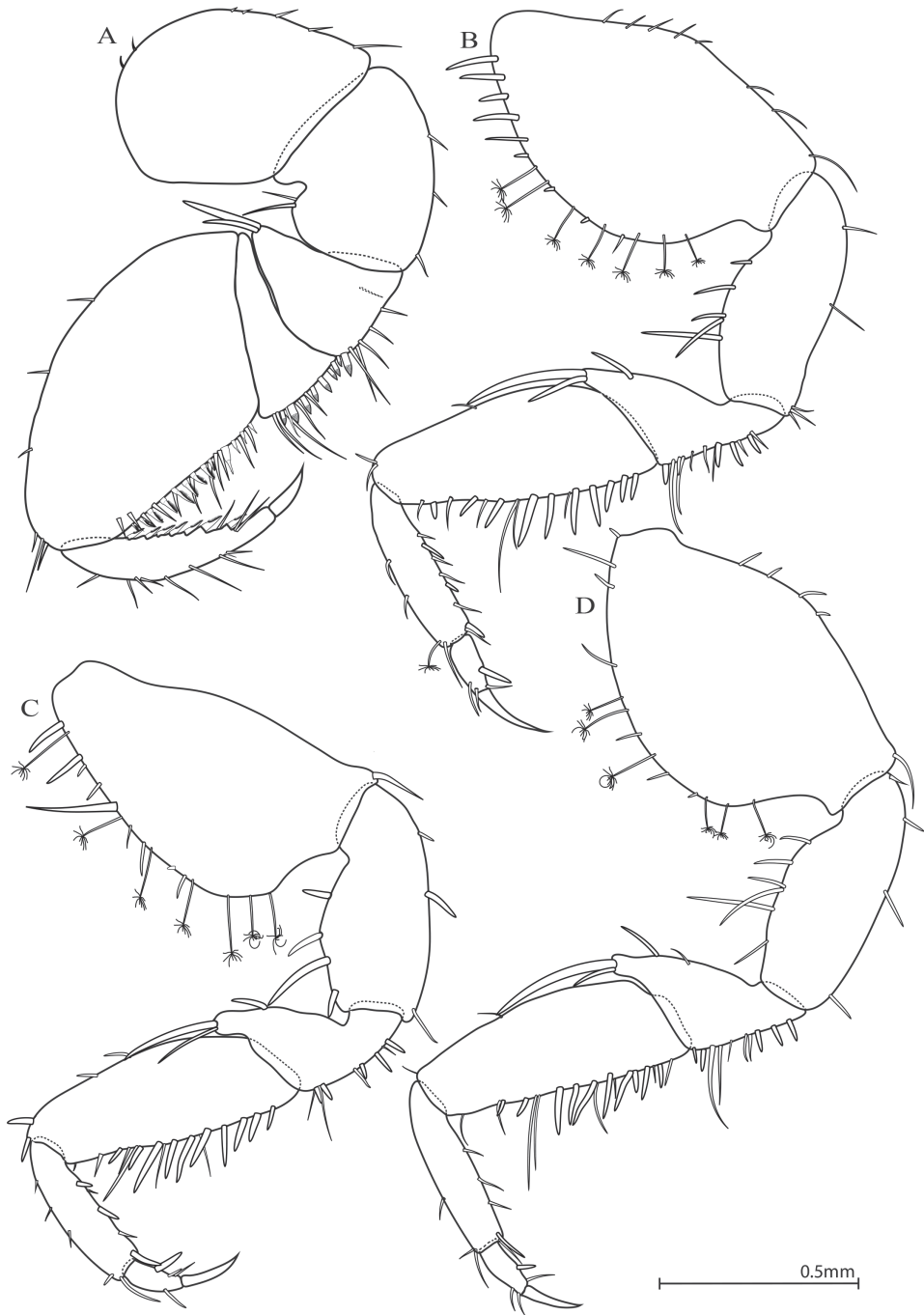


Figure 2. *Metastenasellus boutini* sp. nov., ((A–D) ♂ holotype 9.8 mm) (A) pereopod 1 (B) pereopod 2 (C) pereopod 3 (D) pereopod 4.



Figure 3. *Metastenasellus boutini* sp. nov., ((A–C) ♂ holotype 9.8 mm) (A), pereopod 5 (B) pereopod 6 (C) pereopod 7.

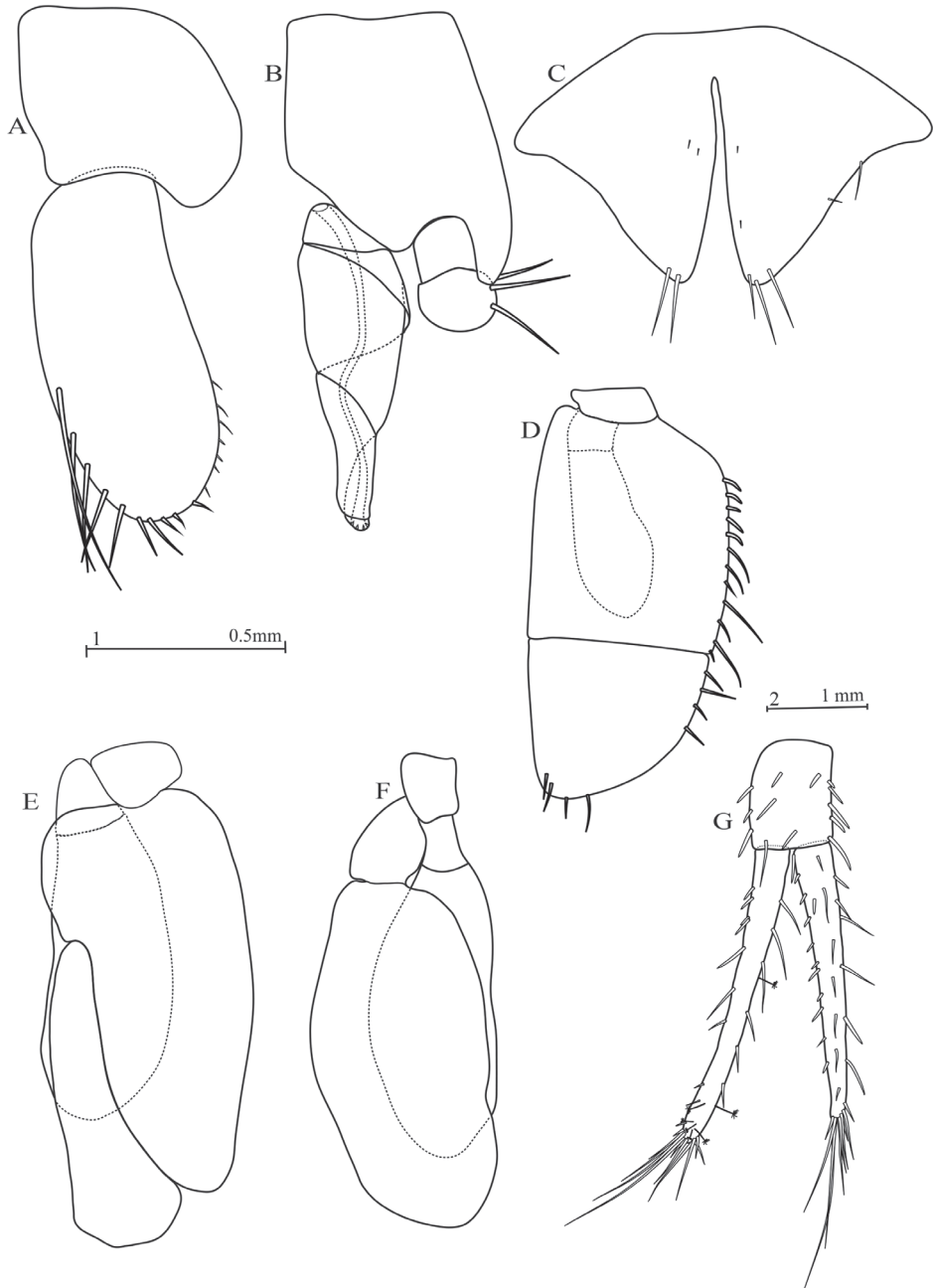


Figure 4. *Metastenasellus boutini* sp. nov., ((**A–B, D–G**) ♂ holotype 9.8 mm (**C**) ♀ paratype 8 mm) (**A**) pleopod 1 (scale 1) (**B**) pleopod 2 (scale 1) (**C**) ♀ pleopod 2 (scale 1) (**D**) pleopod 3 (scale 2) (**E**) pleopod 4 (scale 1) (**F**) pleopod 5 (scale 1) (**G**), uropod (scale 2).

setae. Pleopod 3 (Fig. 4D) with a very short protopodite; endopodite smaller than the first article of the exopodite and biarticulated, with the second article, larger, distally oval; exopodite also biarticulated, first article long and subrectangular, bearing on its external margin 12 setae of varying size; second article subtriangular, shorter than the first one and bearing 4 simple proximal setae on its external margin and 4 apical setae. Pleopod 4 (Fig. 4E) with a short protopodite; endopodite biarticulated with the second article more than 3 times longer than the first one; exopodite large, glabrous, with very oblique interarticular suture, first article much larger and longer than the second one. Pleopod 5 (Fig. 4F) with a subrectangular protopodite; endopodite biarticulated with the second article more than 4 times as long as the first one; exopodite biarticulated, slightly longer than endopodite; first article short, second article much larger and longer than the first one. Uropod (Fig. 4G) biramous as long as the pleotelson; protopodite subrectangular with dorsal and marginal setae; endopodite slightly longer than exopodite, both with numerous setae and spines and with several long apical setae; sensorial setae present only on the endopodite.

Female. Females are very similar to males with a reduced chaetotaxis on uropods. They are slightly longer than males, size up to 12 mm. Pleopod 2 (Fig. 4C) typical of female *Metastenasellus* formed by two single sub-triangular plates, with external and distal angles rounded. The lateral and apical margins of plates varied from concave to convex and bear few setae (0 to 3) each. Left and right pleopodal plates joined over 10% of their proximal part and are well separated on their distal part. Each plate bearing several (5–10) small ventral setae.

Differential diagnosis

The new species differs from most of species of *Metastenasellus* by the presence of an external lobe on the protopodite of pleopod 2 which is known only in *Metastenasellus leysi* Magniez, 1985. However, *M. boutini* differs from *M. leysi* by many other characteristics such as the total length (< 3.5 mm for *M. leysi*); the number of articles on flagellum of antenna 1 and 2 (2 and 13, respectively) much reduced for *M. leysi* in comparison with *M. boutini* (15 and 48, respectively); pleonites 1 and 2 as long as pereonite 7 for *M. leysi* (as long as 0.5 fold pereonite 7 for *M. boutini*). The shape of the endopodite of pleopod 2 of *M. boutini* is also characterized by a distal part of spermatid duct slightly protruding out the second article. By these characteristics, the new species strongly differs from *M. camerounensis*, *M. leleupi* (Chappuis 1951), *M. dartivellei* (Chappuis 1952), *M. congolensis* (Chappuis 1951), and *M. powelli* Magniez 1979. By its spermatid duct, *M. boutini* resembles to *M. wikkiensis* Lincoln 1972 and *M. tarrissei* Magniez 1979. It differs from *M. wikkiensis* by a shorter size of the uropod, as long as 50% the pleotelson for *M. boutini* (as long as 2 fold the length of the pleotelson in longest specimens of *M. wikkiensis*) and by the absence of the terminal setae on the second article of the exopodite of pleopod 2 (terminal setae present in *M. wikkiensis*). *M. boutini* differs from *M. tarrissei* by the total length and the number of article on flagellum of antenna 1 (8 for *M. tarrissei* and 15 *M. boutini*); pleonites 1 and 2 shorter than pereonite 7 for *M. boutini* (as long as the length of pereonite 7 for *M. tarrissei*).

Molecular analysis

We sequenced and analyzed DNA from five individuals from four wells, including the type locality at Douala. Based on the Folmer's fragment of COI marker, the new species is clearly distinct from the other species sequenced in Cameroon and in Benin. The pairwise genetic distances between *M. boutini* and all other species varied between 22.4 and 27.8% for Cameroonian species and even 28.2% for the species in Benin (Fig. 5). In addition to genetic distance and morphological distinctness, all delimitation methods clearly highlighted the existence of at least five distinct lineages of *Metastenasellus* in the material available for Africa (Fig. 5). All delimitation methods confirmed that individuals from wells at PK21 belong to the same lineage. Consequently and in addition to morphological distinctness, molecular data support the hypothesis that *M. boutini* can be considered as a new species, which strongly differs from *M. camerounensis* and the two other species already sequenced in Cameroon indicated as *Metastenasellus* sp1 and sp2.

Ecology and distribution

The new species *M. boutini* was collected in 7 of the 10 wells sampled in quarter PK21 of Douala (Table 1) city but was not found in the other 31 wells sampled in the same city. Isopod abundance in the wells was two-fold higher during the dry season than in the wet season.

The water chemistry of phreatic water in this part of the city was very acidic (pH = 4.2 ± 0.4), relatively warm, and well oxygenated with relatively low concentrations of calcium and magnesium (Table 2). We did not observe any statistically significant difference between the wells that harbored isopods and the wells without isopods (p-values > 0.092), whether in terms of physical traits (total depth, water depth) or physico-chemical parameters (Table 2). We also compared the seasonal variation of the stability of environmental conditions of the wells that harbored isopod *vs.* the wells without isopods, but no difference was observed (data not shown).

Distribution of Stenasellidae in Africa

The known distribution of Stenasellidae in Africa is very patchy (most of the species are known only from their type localities). Genera belong to three main geographic groups (Fig. 7). One group located in the eastern part of the continent (Kenya and Somalia) include two genera and eight species: *Acanthstenasellus forficuloides* Chelazzi & Messana, 1985; *Stenasellus agiuranicus* Chelazzi & Messana, 1987; *S. costai* Lanza, Chelazzi & Messana, 1970 ; *S. kenyensis* Magniez, 1975; *S. migiurtinicus* Messana, Chelazzi & Lanza, 1974; *S. pardii* Lanza, 1966; *S. ruffoi* Messana, 1993; *S. simonsi* Messana, 1999. A second group is located in north-western Africa and includes three genera and 10 species. Most of them are located in western Africa: *Parastenasellus chapuisi* (Remy, 1938); *Magniezia africana* (Monod, 1945); *M. gardei* Magniez, 1978; *M. guinensis* (Braga, 1950), *M. laticarpa* (Birstein, 1972); *M. studiosorum* Sket, 1969.

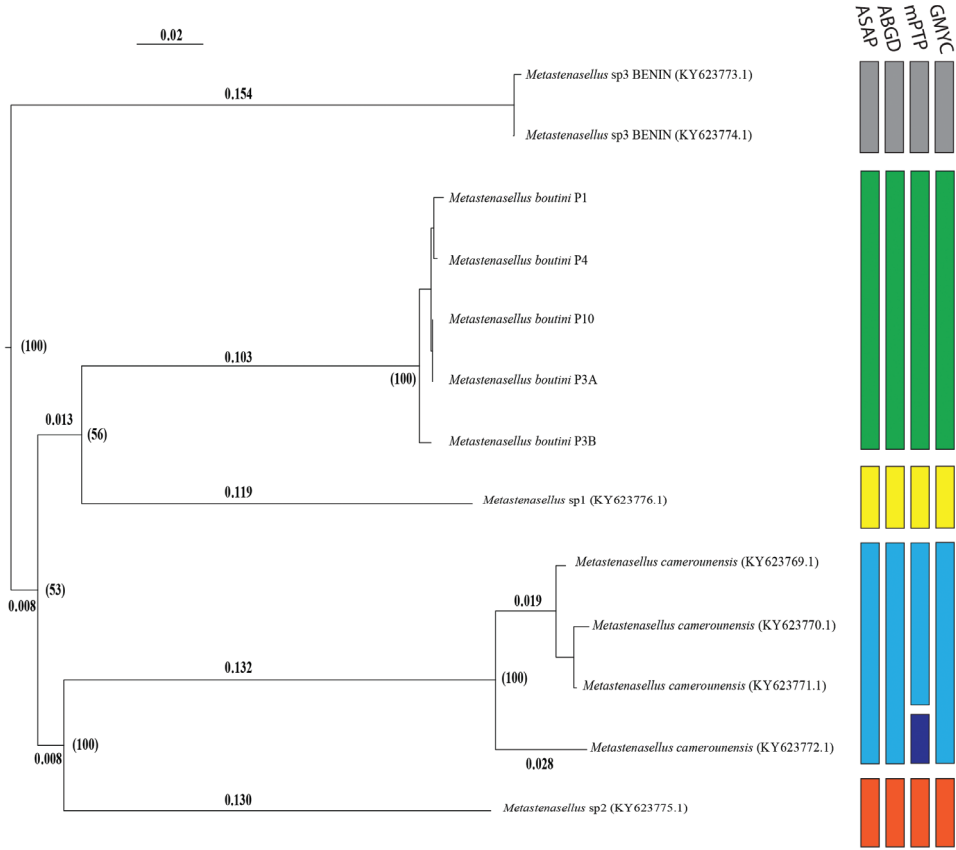


Figure 5. Neighbor-joining tree of the identified COI gene haplotypes. The evolutionary distances were computed using the Kimura two-parameter (K2P) model. Numbers between brackets in front of the nodes indicate bootstrap support (1,000 replicates). Boxes on the right indicate the best partition of species using ASAP, ABGD, mPTP and GMYC delimitation methods.

Table 2. Mean (min–max) values of physico-chemical parameters of wells sampled in quarter PK21 where *M. boutini* were found at Doula.

	Wells with <i>M. boutini</i>	Wells without isopod
Depth (m)	7.4 (6 – 9)	7.8 (7.6 – 8)
Water layer (cm)	157.7 (30 – 310)	116.2 (30 – 245)
Temperature (°C)	26.2 (22.4 – 29.5)	26.2 (22.7 – 28.7)
pH (IU)	4.2 (3.4 – 5.1)	4.23 (3.92 – 4.92)
O ₂ (mg/L)	5.3 (3.8 – 8.2)	5.31 (3.3 – 7.4)
Electrical Conductivity (µS/Cm)	587 (155 – 822)	646 (192 – 947)
NO ₃ ⁻ (mg/L)	1.3 (0 – 3.5)	1.0 (0 – 3.1)
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	0.95 (0 – 3.1)	0.8 (0 – 2.9)
Ca ²⁺ (mg/L)	2.0 (0.2 – 4)	2.1 (1.1 – 2.6)
Mg ²⁺ (mg/L)	4.4 (0.3 – 11.4)	8.3 (1.3 – 14)

Only one species (*Johannella purpurea* Monod, 1924) of the genus *Johanella* is present in Algeria. The third group is only composed by the genus *Metastenasellus* and is widely distributed from the Democratic Republic of Congo to Algeria with 9 known species.

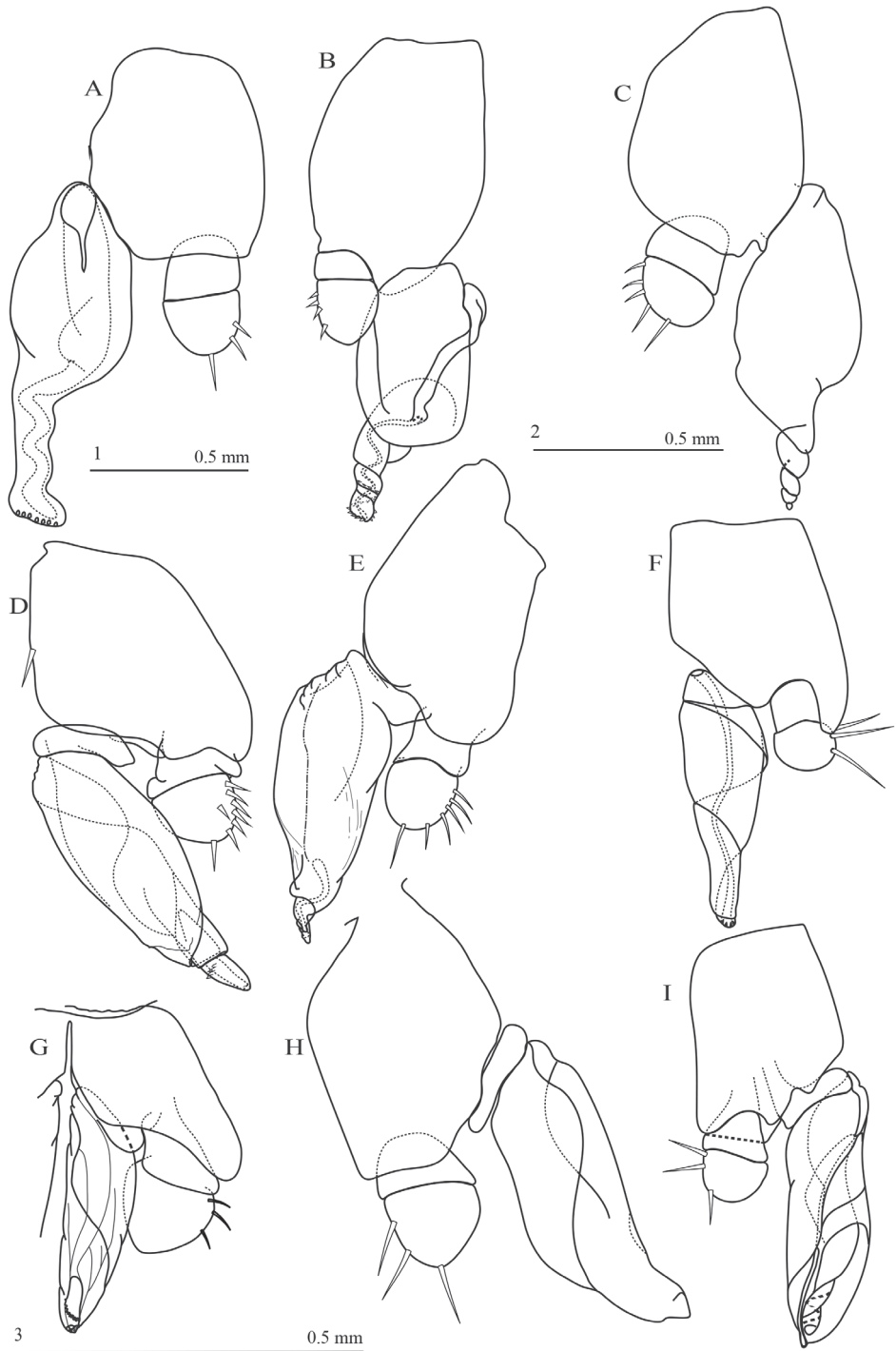


Figure 6. Pleopods 2 of males *Metastenasellus* as drawn in original descriptions (**A**) *M. leleupi* (scale 1) (**B**) *M. camerounensis* (scale 1) (**C**) *M. dartivellei* (scale 2) (**D**) *M. powelli* (scale 3) (**E**) *M. congolensis* (scale 1) (**F**) *M. boutini* (scale 2) (**G**) *M. leysi* (scale 3) (**H**) *M. wikkiensis* (scale 2) (**I**) *M. tarrisei* (scale 3).

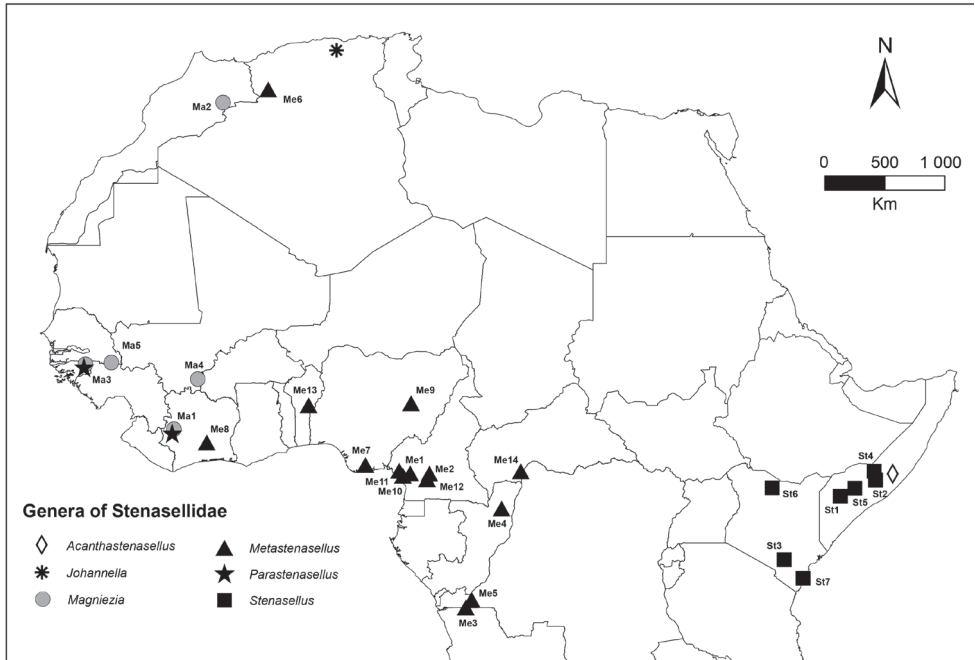


Figure 7. Distribution map of Stenasellidae in Africa: *Acanthastenasellus* (*A. forficuloides*); *Johannella* (*J. purpurea*); *Magniezia* (Ma1: *M. africana*, Ma2: *M. gardei*, Ma3: *M. guinensis*, Ma4: *M. laticarpa*, Ma5: *M. studiosorum*); *Metastenasellus* (Me1: *M. boutini*, Me2: *M. camerounensis*, Me3: *M. congolensis*, Me4: *M. dartvellei*, Me5: *M. leleupi*, Me6: *M. leysi*, Me7: *M. powelli*, Me8: *M. tarrissei*, Me9: *M. wikkiensis*, Me10: *Metastenasellus* sp1, Me11: *Metastenasellus* sp2, Me12: *Metastenasellus* sp3, Me13: *Metastenasellus* sp. 4, Me14: *Metastenasellus* sp5); *Parastenasellus* (*P. chappuisi*); *Stenasellus* (St1: *S. agiuranicus*, St2: *S. costai*, St3: *S. kenyensis*, St4: *S. migiurtinicus*, St5: *S. pardii*, St6: *S. ruffoi*, St7: *S. simonsi*).

Discussion

Taxonomic position of *Metastenasellus boutini*

The first stenasellid isopods were found for the first time in France in 1896 and later described as *Stenasellus virei* Dolfus, 1897. This first species was followed by successive discoveries in southern and central Europe in the early 1900's (Magniez 1999) together with the first African stenasellid, *Johannella purpurea* in Algeria (Monod 1924). More recent discoveries of new species in western, central, and eastern Africa have modified the taxonomy of the family in-depth, with the description of seven new genera since 1966 and especially the genus *Metastenasellus* (Magniez 1966). Magniez originally defined this genus as displaying well-developed pleonites 1 and 2, dactyli of pereopods 2–7 with one sternal spine, the male protopodite of pleopod 1 without a coupling hook and the male endopodite of pleopod 2 very voluminous and a helicoidal spermatid duct. A few years later, the diagnosis was slightly updated by changing the relative size of pleonites 1 and 2 compared to the length of pereonite 7 (Magniez 1979). In his original diagnosis, pleonites 1 and 2 reached at least 2/3 of pereonite 7. However, the discovery of *M. wikkiensis*

sis Lincoln 1972 with reduced pleonites 1 and 2 (50% of pereonite 7) required an update of the diagnosis of the genus: the ratio of the length of pleonites 1 and 2 to the pereonite 7 has to be higher than 50%. Until the discovery of *M. camerounensis* in Cameroon (Zebaze Togouet et al. 2013), the ratio of 50% was restricted to *M. wikkiensis*. Our description of *M. boutini* with a similar ratio provides a third species of the genus with such a ratio and confirms the diagnostic validity of this criterium for the genus *Metastenasellus*.

Despite the geographical proximity of *M. camerounensis* and *M. boutini*, their morphology differs strongly. The two species have a relatively large size among *Metastenasellus* and a similar pleonites/pereonite 7 ratio, but the shape of pleopod 2 strongly differs. In *M. boutini*, the endopodite of pleopod 2 is evolved, with a distal part of the spermatic duct almost fully inside the second article of the endopodite. This specificity is considered as the ultimate evolution of pleopod 2 in the genus *Metastenasellus* (Magniez 1979), whereas the shape of the endopodite of *M. camerounensis* is much more primitive (50% of the spermatic duct is out of the second article) as for *M. leleupi*. By the shape of the pleopod 2, *M. boutini* is closer to *M. wikkiensis* found in Nigeria than to *M. camerounensis*. However, based on other characteristics such as the external lobes on the protopodite of pleopod 2, *M. boutini* is also close to the dwarf species *M. leisi* found in Algeria.

As suggested by previous studies, the second male pleopod exhibits several significant differences among *Metastenasellus* species (Magniez 1991; Zebaze Togouet et al. 2013). Among the many characteristics of pleopod 2, species can be separated into two main groups according to the shape of article 2 of the endopodite. The *Metastenasellus leleupi* group is characterized by a distal part of the spermatic duct clearly protruding out the second article of the endopodite (i.e a primitive characteristics *sensu* Magniez 1979); the group is composed of 5 species (*M. leleupi*, *M. camerounensis*, *M. dartivellei*, *M. powelli*, *M. congolensis*). The second group, the *M. tarrissei* group is composed of more evolved species whose distal part of the spermatic ducts is almost or fully inside the second article of the endopodite (*M. boutini*, *M. tarrissei*, *M. wikkiensis*, and *M. leysi*). However, the differences between these two taxonomic groups are not sufficient to distribute these species into two genera. Firstly, the morphological characteristics of all species fit the diagnosis of the genus for all traits (Magniez 1979), and secondly the difference among species are not dichotomous but follow a continuous gradient from *M. leleupi* to *M. tarrissei*.

Ecology and distribution of Stenasellidae in Africa

The stygobitic family Stenasellidae is widely distributed in southwestern Europe, the Middle East, Asia, and even Central America (Magniez 1999; Lewis and Sawicki 2016). In Africa, stenasellid isopods can colonize a wide range of environmental niches under very different climate conditions ranging from dry Saharan climate to wet equatorial climate (Magniez, 1999). For instance, the family is known to be tolerant to a very wide range of pH values (from 3.4 for *M. boutini* in this study to 8 for *Acanthstenasellus* in Somalia) as well as a wide range of altitudes (from 0 to 1300 m a.s.l. for *M. leysi* in Algeria) and temperatures (more than 34 °C for *S. rufoi* in Kenya). They have large pleopods 3, 4, and 5 (gills) and their red/pink color indicates a high amount of haemo-

lymph which likely enables them to withstand poor oxygen concentrations, even if this point has not been studied (Magniez 1999). However, and despite their wide environmental tolerance, there is no mention of stenassellids in brackish water and their known localities do not exceed a salinity of 3 g.L⁻¹ for *S. ruffoi* (Messana, 1993).

Stenasellids can also colonize all kinds of groundwaters (karst, interstitial and phreatic waters) (Magniez 1999). The wide “tethyan” distribution of stenassellids suggests the presence of an ancestor at least during the Upper Cretaceous. This hypothesis is well supported by the molecular phylogeny of Asellota (Morvan et al. 2013) showing that stenassellids were already present on Pangaea during the late Paleozoic (\cong 250 MYA), while African and Nearctic stenassellids were geographically separated. The lack of data about the distribution of stenassellids in Africa does not allow us to draw a clear conclusion about their biogeography in Africa.

Key to *Metastenasellus* species

This identification key concerns males of the nine currently known species of the genus *Metastenasellus*: *M. leleupi* (Chappuis, 1951); *M. congolensis* (Chappuis, 1951); *M. dartivellei* (Chappuis, 1952); *M. wikkiensis* Lincoln, 1972; *M. powelli* Magniez, 1979; *M. tarrisei* Magniez, 1979; *M. leysi* Magniez, 1986; *M. camerounensis* Zebaze Togouet, Boulanouar, Njiné & Boutin, 2013, *M. boutini* Pountougnigni, Piscart & Zebaze (present study).

Like the key proposed by Zebaze et al. (2013), our key is largely based on the second male pleopod. However, the intermediate size of *M. boutini* did not allow us to just update the key proposed by Zebaze et al. (2013). As a consequence, the new key was largely rebuilt, as follows:

- 1 Pleopod 2, distal part of spermatic duct clearly protruding out of the main part of the second article of endopodite (Fig. 6A–E) **2**
- Pleopod 2, distal part of spermatic duct slightly protruding out or fully inside the second article of endopodite (Fig. 6 F–I)..... **6**
- 2 Pleopod 2, external part of spermatic duct strongly protruding out (\geq 50%) of the second article of endopodite (Fig. 6A–B) **3**
- Pleopod 2, external part of spermatic duct slightly protruding out (\approx 20%) of the second article of endopodite (Fig. 6C–E) **4**
- 3 Pleopod 2, second article of endopodite subrectangular, external part of spermatic duct half the length of second article of endopodite with a row of chitinous teeth along the last 2 whorls, second article of exopodite with 4 marginal and subterminal setae but without a terminal seta; total body length > 10 mm; (Fig. 6B)....
..... ***M. camerounensis* [Yaoundé, Cameroon]**
- Pleopod 2, second article of endopodite conical, external part of spermatic duct of the same length as the second article of endopodite with a row of chitinous teeth only at the apex, second article of exopodite with 2 or 3 setae with a terminal seta at the apex; total body length < 8 mm (Fig. 6A)
..... ***M. leleupi* [Kinshasa Province, Democratic Republic of the Congo]**

- 4 Pleopod 2, first segment of endopodite clearly delimited, second article of exopodite with 6 to 8 setae (Fig. 6D-E); flagellum of antenna 2 with more than 45 articles.....**5**
- Pleopod 2, first segment of endopodite not clearly delimited, second article of the exopodite with 5 setae (Fig. 6C); flagellum of antenna 2 with no more than 35 articles..... ***M. dartivellei* [Équateur province, northwestern Democratic Republic of the Congo]**
- 5 Pleopod 2 protopodite longer than wide (Fig. 6D); protopodite margin of pleopod 1 straight; flagellum of antenna 1 with less than 10 articles; total body length < 8 mm ***M. powelli* [Port Harcourt, southeastern Nigeria]**
- Pleopod 2 protopodite longer than wide (Fig. 6E); protopodite margin of pleopod 1 convex or concave; flagellum of antenna 1 with at least 18 articles; total body length > 10 mm ***M. congolensis* [Congo Central Province, eastern Democratic Republic of the Congo]**
- 6 Pleonites 1 and 2 as long as pereonite 7; flagellum of antenna 1 with less than 8 articles; flagellum of antenna 2 with less than 25 articles; total body length ≤ 5 mm**7**
- Pleonites 1 and 2 as long as 50% of pereonite 7; flagellum of antenna 1 with 8 articles; flagellum of antenna 2 with more than 25 articles; total body length ≥ 8 mm **8**
- 7 Pleopods 2 exopodite wider than endopodite; exopodite and endopodite not clearly separated (Fig. 6G); flagellum of antenna 1 with 2 articles; flagellum of antenna 2 with 13 articles; total body length ≤ 3.5 mm ***M. leysi* [Naâma Province, northeastern Algeria]**
- Pleopod 2 endopodite wider than exopodite; exopodite and endopodite well separated (Fig. 6I); flagellum of antenna 1 with 7 articles; flagellum of antenna 2 with 25 articles; total body length ≅ 5 mm..... ***M. tarrissei* [Lake District, central Ivory Coast]**
- 8 Pleopod 2 protopodite with an external lobe, second article without terminal setae (Fig. 6F); uropod never as long as 50% of the pleotelson ***M. boutini* [Douala, southwestern Cameroon]**
- Pleopods 2 protopodite without an external lobe, second article with a terminal seta (Fig. 6H); uropod twice the length of the pleotelson for the longest males ... ***M. wikkiensis* [Plateau State, northeastern Nigeria]**

Acknowledgements

This study was supported by the University Yaoundé 1 (Cameroon) and the financial support of the Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) and the French Embassy (SCAC 2021) that permitted the work of O.F. Pountougnigni in France.

References

- Costa F, Henzler C, Lunt D, Whiteley NM, Rock J (2009) Probing marine Gammarus (Amphipoda) taxonomy with DNA barcodes. *Systematics and Biodiversity* 7: 365–379. <https://doi.org/10.1017/S1477200009990120>
- Cvetkov L (1968) Un filet phréatobiologique. *Bulletin de l'Institut de Zoologie & Musée, Sofia* 22: 215–219.
- Darriba D, Taboada GL, Doallo R, Posada D (2012) jModelTest 2: more models, new heuristics and parallel computing. *Nature Methods* 9: e772. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2109>
- Edgar RC (2004) MUSCLE: multiple sequence alignment with high accuracy and high throughput. *Nucleic Acids Research* 32: 1792–1797. <https://doi.org/10.1093/nar/gkh340>
- Eme D, Zagamajster M, Delić T, Fišer C, Flot J-F, Konecny L, Pálsson S, Stoch F, Zakšek V, Douady C, Malard F (2018) Do cryptic species matter in macroecology? Sequencing European groundwater crustaceans yields smaller ranges but does not challenge biodiversity determinants. *Ecography* 41: 424–436. <https://doi.org/10.1111/ecog.02683>
- Folmer O, Black M, Wr H, Lutz R, Vrijenhoek R (1994) DNA primers for amplification of mitochondrial Cytochrome C oxidase subunit I from diverse metazoan invertebrates. *Molecular marine biology and biotechnology* 3: 294–9.
- Gibert J, Culver DC (2009) Assessing and conserving groundwater biodiversity: an introduction. *Freshwater Biology* 54: 639–648. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02202.x>
- Gouy M, Tannier E, Comte N, Parsons DP (2021) Seaview Version 5: A multiplatform software for multiple sequence alignment, molecular phylogenetic analyses, and tree reconciliation. *Methods in Molecular Biology (Clifton, N.J.)* 2231: 241–260. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1036-7_15
- Kapli B, Lutteropp S, Zhang J, Kobert K, Pavlidis P, Stamatakis A, Flouri T (2017) Multi-rate Poisson tree processes for single-locus species delimitation under maximum likelihood and Markov chain Monte Carlo. *Bioinformatics* 33: 1630–1638. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btx025>
- Kimura M (1980) A simple method for estimating evolutionary rates of base substitutions through comparative studies of nucleotide sequences. *Journal of Molecular Evolution* 16: 111–120. <https://doi.org/10.1007/BF01731581>
- Magniez G (1966) Contribution à la systématique des Stenasellinae d'Afrique (Crustacés, Asellotes). *International Journal of Speleology* 2: 173–190. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.2.1.17>
- Magniez G (1979) Un Stenasellide phréatique de Côte d'Ivoire: *Metastenasellus tarrissei* sp. nov. (Crustacé Isopode Asellote). 32: 97–106.
- Magniez G (1991) Bons et mauvais caractères taxinomiques: exemple des Stenasellides d'Extrême-Orient. *Mémoires de Biospéléologie* 18: 99–104.
- Magniez G (1999) A review of the family Stenasellidae (Isopoda, Asellota, Aselloidea) of underground waters. *Crustaceana* 72: 837–848. <https://doi.org/10.1163/156854099503988>
- Messana G (1988) Stygobitic isopods East Africa. *Biogeographia* 14: 113–124. <https://doi.org/10.21426/B614110386>
- Monod Th (1924) Sur quelques Asellides nouveaux des eaux douces de l'Afrique du Nord. *Bulletin de La Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord*: 327–336.

- Morvan C, Malard F, Paradis E, Lefébure T, Konecny-Dupré L, Douady CJ (2013) Timetree of Aselloidea reveals species diversification dynamics in groundwater. *Systematic Biology* 62: 512–522. <https://doi.org/10.1093/sysbio/syt015>
- Nana Nkemegni G, Togouet SHZ, Fomena A, Pountougnigni OF, Piscart C (2015) Aquatic invertebrate fauna of wells in a tropical mountain climate, western Cameroon. *African Journal of Aquatic Science* 40: 393–401. <https://doi.org/10.2989/16085914.2015.1113922>
- Olivry J-C (1986) Fleuves et rivières du Cameroun. ORSTOM, Paris, 745 pp.
- Pons J, Barraclough TG, Gomez-Zurita J, Cardoso A, Duran DP, Hazell S, Kamoun S, Sumlin WD, Vogler AP (2006) Sequence-Based Species Delimitation for the DNA Taxonomy of Undescribed Insects, *Systematic Biology* 55: 595–609. <https://doi.org/10.1080/10635150600852011>
- Puillandre N, Brouillet S, Achaz G (2021) ASAP: assemble species by automatic partitioning. *Molecular Ecology Resources* 21: 609–620. <https://doi.org/10.1111/1755-0998.13281>
- Sket B (1999) The nature of biodiversity in hypogean waters and how it is endangered. *Biodiversity and Conservation* 8: 1319–1338. <https://doi.org/10.1023/A:1008916601121>
- Stoch F (1995) The ecological and historical determinants of crustacean diversity in groundwaters, or: Why are there so many species? *Mémoires de Biospéologie* 22: 139–160.
- Tuekam Kayo RP, Marmonier P, Zebaze Togouet SH, Nola M, Piscart C (2012) An annotated checklist of freshwater stygobiotic crustaceans of Africa and Madagascar. *Crustaceana* 85: 1613–1631. <https://doi.org/10.1163/15685403-00003134>
- Vences M, Miralles A, Brouillet S, Ducasse J, Fedosov A, Kharchev V, Kostadinov I, Kumari S, Patmanidis S, Scherz MD, Puillandre N, Renner SS (2021) iTaxoTools 0.1: Kickstarting a specimen-based software toolkit for taxonomists. *bioRxiv*: 2021.03.26.435825. <https://doi.org/10.1101/2021.03.26.435825>
- Zebaze Togouet SH, Boulanouar M, Njiné T, Boutin C (2013) First discovery of a Stenaselidae (Crustacea, Isopoda, Aselloidea) in the ground waters of Cameroon (Central Africa): description, origin and palaeogeographic implications of *Metastenasellus camerounensis* sp. nov *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Toulouse* 149: 153–166.

Supplementary material I

List of sampling sites with or without *Metastenasellus boutini* in the area around the type locality

Authors: Pountougnigni Oumarou Farikou, Piscart Christophe, Sob Nangou Paul Bertrand, Zebaze Togouet Serge Hubert

Data type: occurrences

Copyright notice: This dataset is made available under the Open Database License (<http://opendatacommons.org/licenses/odbl/1.0/>). The Open Database License (ODbL) is a license agreement intended to allow users to freely share, modify, and use this Dataset while maintaining this same freedom for others, provided that the original source and author(s) are credited.

Link: <https://doi.org/10.3897/subtbiol.40.76301.suppl1>