

UNIVERSITE DE YAOUNDE I  
\*\*\*\*\*  
UNIVERSITY OF YAOUNDE I



FACULTE DES SCIENCES  
\*\*\*\*\*  
FACULTY OF SCIENCE

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE ANIMALES  
*DEPARTMENT OF ANIMAL BIOLOGY AND PHYSIOLOGY*

LABORATOIRE D'HYDROBIOLOGIE ET ENVIRONNEMENT  
*LABORATORY OF HYDROBIOLOGY AND ENVIRONMENT*

# Impact de la pression anthropique sur la qualité faunique et bactériologique des eaux souterraines de la ville de Moundou (Tchad) et risques sanitaires

THESE

Présentée et soutenue le 09 décembre 2022 en vue de l'obtention du diplôme de  
Doctorat/Ph.D de Biologie des Organismes Animaux  
Option : **Hydrobiologie et Environnement**

Par

**DIONKAS Jairus**  
Matricule 12Q1323  
*Master ès-Sciences*



Devant le jury composé de :

Président : **BILONG BILONG Charles Félix**, Professeur, Université de Yaoundé I;

Rapporteur: **ZÉBAZÉ TOGOUET Serge Hubert**, Professeur, Université de Yaoundé I

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

**NGAKOU Albert**, Professeur, Université de Ngaoundéré ;

**AJEAGAH Gideon AGHAINDUM**, Professeur, Université de Yaoundé I.

Année 2022

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

**ANNÉE ACADEMIQUE 2021/2022**

(Par Département et par Grade)

**DATE D'ACTUALISATION 22 septembre 2021**

**ADMINISTRATION**

**DOYEN:** TCHOUANKEU Jean- Claude, *Maître de Conférences*

**VICE-DOYEN / DPSAA:** ATCHADE Alex de Théodore, *Maître de Conférences*

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

**VICE-DOYEN / DRC:** ABOSSOLO Monique, *Maître de Conférences*

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

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

**1- DÉPARTEMENT DE BIOCHIMIE (BC) (37)**

N°	NOMS ET PRÉNOMS	GRADE	OBSERVATIONS
1	BIGOGA DAIGA Jude	Professeur	En poste
2	FEKAM BOYOM Fabrice	Professeur	En poste
3	FOKOU Elie	Professeur	En poste
4	KANSCI Germain	Professeur	En poste
5	MBACHAM FON Wilfried	Professeur	En poste
6	MOUNDIPA FEWOU Paul	Professeur	Chef de Département
7	NINTCHOM PENLAP V. épouse BENG	Professeur	En poste
8	OBEN Julius ENYONG	Professeur	En poste
9	ACHU Merci BIH	Maître de Conférences	En poste
10	ATOGHO Barbara Mma	Maître de Conférences	En poste
11	AZANTSA KINGUE GABIN BORIS	Maître de Conférences	En poste
12	BELINGA née NDOYE FOE F. M. C.	Maître de Conférences	Chef DAF / FS
13	BOUDJEKO Thaddée	Professeur	En poste
14	DJUIDJE NGOUNOUE Marceline	Maître de Conférences	En poste
15	EFFA ONOMO Pierre	Maître de Conférences	En poste
16	EWANE Cécile Annie	Maître de Conférences	En poste
17	MOFOR née TEUGWA Clotilde	Maître de Conférences	Inspecteur de Service MINESUP
18	NANA Louise épouse WAKAM	Maître de Conférences	En poste
19	NGONDI Judith Laure	Maître de Conférences	En poste
20	NGUEFACK Julienne	Maître de Conférences	En poste
21	NJAYOU Frédéric Nico	Maître de Conférences	En poste
22	TCHANA KOUATCHOUA Angèle	Maître de Conférences	En poste
23	AKINDEH MBUH NJI	Chargé de Cours	En poste
24	BEBEE Fadimatou	Chargée de Cours	En poste
25	BEBOY EDJENGUELE Sara Nathalie	Chargé de Cours	En poste
25	DAKOLE DABOY Charles	Chargé de Cours	En poste
26	DJUIKWO NKONGA Ruth Viviane	Chargée de Cours	En poste

27	DONGMO LEKAGNE Joseph Blaise	Chargé de Cours	En poste
28	FONKOUA Martin	Chargé de Cours	En poste
29	KOTUE TAPTUE Charles	Chargé de Cours	En poste
30	LUNGA Paul KEILAH	Chargé de Cours	En poste
31	MANANGA Marlyse Joséphine	Chargée de Cours	En poste
32	MBONG ANGIE M. Mary Anne	Chargée de Cours	En poste
33	Palmer MASUMBE NETONGO	Chargé de Cours	En poste
34	PECHANGOU NSANGOU Sylvain	Chargé de Cours	En poste
33	FOUPOUPOUOGNIGNI Yacouba	Assistant	En poste
34	KOUOH ELOMBO Ferdinand	Assistant	En poste
35	MBOUCHE FANMOE Marceline Joëlle	Assistante	En poste
36	OWONA AYISSI Vincent Brice	Assistant	En poste
37	WILFRIED ANGIE Abia	Assistante	En poste

## 2- DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE ANIMALES (BPA) (51)

1	AJEAGAH Gideon AGHAINDUM	Professeur	<i>DAARS/FS</i>
2	BILONG BILONG Charles-Félix	Professeur	Chef de Département
3	DIMO Théophile	Professeur	En Poste
4	DJIETO LORDON Champlain	Professeur	En Poste
5	DZEUFJET DJOMENI Paul Désiré	Professeur	En Poste
6	ESSOMBA née NTSAMA MBALA	Professeur	<i>Vice Doyen/FMSB/UYY</i>
7	FOMENA Abraham	Professeur	En Poste
8	KAMTCHOUING Pierre	Professeur	En poste
9	KEKEUNOU Sévilor	Professeur	En poste
10	NJAMEN Dieudonné	Professeur	En poste
11	NJIOKOU Flobert	Professeur	En Poste
12	NOLA Moïse	Professeur	En poste
13	TAN Paul VERNYUY	Professeur	En poste
14	TCHUEM TCHUENTE Louis Albert	Professeur	<i>Inspecteur de service Coord.Progr./MINSANTE</i>
15	ZEBAZE TOGOUET Serge Hubert	Professeur	En poste
16	BILANDA Danielle Claude	Maître de Conférences	En poste
17	DJIOGUE Séfirin	Maître de Conférences	En poste
18	JATSA BOUKENG Hermine épouse MEGAPTCHE	Maître de Conférences	En Poste
19	LEKEUFACK FOLEFACK Guy B.	Maître de Conférences	En poste
20	MEGNEKOU Rosette	Maître de Conférences	En poste
21	MONY Ruth épouse NTONE	Maître de Conférences	En Poste
22	NGUEGUIM TSOFAK Florence	Maître de Conférences	En poste
23	TOMBI Jeannette	Maître de Conférences	En poste
24	ALENE Désirée Chantal	Maître de Conférences	En poste
25	ATSAMO Albert Donatien	Chargé de Cours	En poste
26	DONFACK Mireille	Chargée de Cours	En poste
27	ETEME ENAMA Serge	Chargé de Cours	En poste
28	GOUNOUE KAMKUMO Raceline	Maître de Conférences	En poste
29	KANDEDA KAVAYE Antoine	Chargé de Cours	En poste
30	MAHOB Raymond Joseph	Chargé de Cours	En poste
31	MBENOUN MASSE Paul Serge	Chargé de Cours	En poste
32	MOUNGANG Luciane Marlyse	Chargée de Cours	En poste
33	MVEYO NDANKEU Yves Patrick	Chargé de Cours	En poste
34	NGOULATEU KENFACK Omer Bébé	Chargé de Cours	En poste
35	NGUEMBOK	Maître de Conférences	En poste
36	NJUA Clarisse Yafi	Chargée de Cours	Chef Div. UBA

37	NOAH EWOTI Olive Vivien	Chargée de Cours	En poste
38	TADU Zephyrin	Chargé de Cours	En poste
39	TAMSA ARFAO Antoine	Chargé de Cours	En poste
40	YEDE	Chargé de Cours	En poste
41	AMPON NSANGOU Indou	Assistant	En poste
42	BASSOCK BAYIHA Etienne Didier	Assistant	En poste
43	ESSAMA MBIDA Désirée Sandrine	Assistante	En poste
44	FEUGANG YOUMSSI François	Assistant	En poste
45	FOKAM Alvine Christelle Epse KEGNE	Assistante	En poste
46	GONWOUO NONO Legrand	Assistant	En poste
47	KOGA MANG DOBARA	Assistant	En poste
48	LEME BANOCK Lucie	Chargé de Cours	En poste
49	NWANE Philippe Bienvenu	Assistant	En poste
50	YOUNOUSSA LAME	Chargé de Cours	En poste

### 3- DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE VÉGÉTALES (BPV) (31)

1	AMBANG Zachée	Professeur	Chef Division/UYII
2	BELL Joseph Martin	Professeur	En poste
3	DJOCGOUE Pierre François	Professeur	En poste
4	MBOLO Marie	Professeur	En poste
5	MOSSEBO Dominique Claude	Professeur	En poste
6	YOUMBI Emmanuel	Professeur	Chef de Département
7	ZAPFACK Louis	Professeur	En poste
8	ANGONI Hyacinthe	Maître de Conférences	En poste
9	BIYE Elvire Hortense	Maître de Conférences	En poste
10	MALA Armand William	Maître de Conférences	En poste
11	MBARGA BINDZI Marie Alain	Maître de Conférences	CT/ MINESUP
12	NDONGO BEKOLO	Maître de Conférences	<i>CE / MINRESI</i>
13	NGODO MELINGUI Jean Baptiste	Maître de Conférences	En poste
14	NGONKEU MAGAPTCHE Eddy L.	Maître de Conférences	En poste
15	TONFACK Libert Brice	Maître de Conférences	En poste
16	TSOATA Esaïe	Maître de Conférences	En poste
17	DJEUANI Astride Carole	Chargé de Cours	En poste
18	GOMANDJE Christelle	Chargée de Cours	En poste
19	MAFFO MAFFO Nicole Liliane	Chargé de Cours	En poste
20	MAHBOU SOMO TOUKAM. Gabriel	Chargé de Cours	En poste
21	NGALLE Hermine BILLE	Chargée de Cours	En poste
22	NNANGA MEBENGA Ruth Laure	Chargé de Cours	En poste
23	NOUKEU KOUAKAM Armelle	Chargé de Cours	En poste
24	ONANA JEAN MICHEL	Chargé de Cours	En poste
25	GODSWILL NTSOMBOH NTSEFONG	Assistant	En poste
26	KABELONG BANAHOU Louis-Paul-Roger	Assistant	En poste
27	KONO Léon Dieudonné	Assistant	En poste
28	LIBALAH Moses BAKONCK	Assistant	En poste
29	LIKENG-LI-NGUE Benoit C	Assistant	En poste
30	TAEDOUNG Evariste Hermann	Assistant	En poste
31	TEMEGNE NONO Carine	Assistant	En poste

**4- DÉPARTEMENT DE CHIMIE INORGANIQUE (CI) (32)**

1	AGWARA ONDOH Moïse	Professeur	<i>Chef de Département</i>
2	DJOUFAC WOUWFO Emmanuel	Professeur	En poste
3	Florence UFI CHINJE épouse MELO	Professeur	<i>Recteur Univ.Ngaoundere</i>
4	GHOGOMU Paul MINGO	Professeur	<i>Ministre Chargé deMiss.PR</i>
5	NANSEU Njiki Charles Péguy	Professeur	En poste
6	NDIFON Peter TEKE	Professeur	<i>CT MINRESI</i>
7	NDIKONTAR Maurice KOR	Professeur	<i>Vice-Doyen Univ. Bamenda</i>
8	NENWA Justin	Professeur	En poste
9	NGAMENI Emmanuel	Professeur	<i>DOYEN FS UDs</i>
10	NGOMO Horace MANGA	Professeur	<i>Vice Chancellor/UB</i>
11	ACAYANKA Elie	Maître de Conférences	En poste
12	EMADACK Alphonse	Maître de Conférences	En poste
13	KAMGANG YOUNBI Georges	Maître de Conférences	En poste
14	KEMMEGNE MBOUGUEM Jean C.	Maître de Conférences	En poste
15	KONG SAKEO	Maître de Conférences	En poste
16	NDI NSAMI Julius	Maître de Conférences	En poste
17	NJIOMOU C. épse DJANGANG	Maître de Conférences	En poste
18	NJOYA Dayirou	Maître de Conférences	En poste
19	TCHAKOUTE KOUAMO Hervé	Maître de Conférences	En poste
20	BELIBI BELIBI Placide Désiré	Chargé de Cours	CS/ ENS Bertoua
21	CHEUMANI YONA Arnaud M.	Chargé de Cours	En poste
22	KENNE DEDZO GUSTAVE	Chargé de Cours	En poste
23	KOUOTOU DAOUDA	Chargé de Cours	En poste
24	MAKON Thomas Beaugard	Chargé de Cours	En poste
25	MBEY Jean Aime	Chargé de Cours	En poste
26	NCHIMI NONO KATIA	Chargé de Cours	En poste
27	NEBAH Née NDOSIRI Bridget NDOYE	Chargée de Cours	CT/ MINPROFF
28	NYAMEN Linda Dyorisse	Chargée de Cours	En poste
29	PABOUDAM GBAMBIE A.	Chargée de Cours	En poste
30	NJANKWA NJABONG N. Eric	Assistant	En poste
31	PATOUOSSA ISSOFA	Assistant	En poste
32	SIEWE Jean Mermoz	Assistant	En Poste

**5- DÉPARTEMENT DE CHIMIE ORGANIQUE (CO) (40)**

1	DONGO Etienne	Professeur	Vice-Doyen/FSE/UYI
2	GHOGOMU TIH Robert Ralph	Professeur	Dir. IBAF/UDA
3	NGOUELA Silvère Augustin	Professeur	Chef de Département UDS
4	NYASSE Barthélemy	Professeur	En poste
5	PEGNYEMB Dieudonné Emmanuel	Professeur	<i>Directeur/ MINESUP/ Chef de Département</i>
6	WANDJI Jean	Professeur	En poste
7	Alex de Théodore ATCHADE	Maître de Conférences	Vice-Doyen / DPSAA
8	AMBASSA Pantaléon	Maître de Conférences	En poste
9	EYONG Kenneth OBEN	Maître de Conférences	En poste
10	FOLEFOC Gabriel NGOSONG	Maître de Conférences	En poste
11	FOTSO WABO Ghislain	Maître de Conférences	En poste
12	KEUMEDJIO Félix	Maître de Conférences	En poste
13	KENMOGNE Marguerite	Maître de Conférences	En poste
14	KOUAM Jacques	Maître de Conférences	En poste
15	MBAZOA née DJAMA Céline	Maître de Conférences	En poste

16	MKOUNGA Pierre	Maître de Conférences	En poste
17	MVOT AKAK CARINE	Maître de Conférences	En poste
18	NGO MBING Joséphine	Maître de Conférences	Sous/Direct. MINERESI
19	NGONO BIKOBO Dominique Serge	Maître de Conférences	C.E/ MINESUP
20	NOTE LOUGBOT Olivier Placide	Maître de Conférences	C.S/ MINESUP
21	NOUNGOUE TCHAMO Diderot	Maître de Conférences	En poste
22	TABOPDA KUATE Turibio	Maître de Conférences	En poste
23	TAGATSING FOTSING Maurice	Maître de Conférences	En poste
24	TCHOUANKEU Jean-Claude	Maître de Conférences	<i>Doyen /FS/ UYI</i>
25	TIH née NGO BILONG E. Anastasie	Maître de Conférences	En poste
26	YANKEP Emmanuel	Maître de Conférences	En poste
27	ZONDEGOUNBA Ernestine	Maître de Conférences	En poste
28	KAMTO Eutrophe Le Doux	Chargé de Cours	En poste
29	NGNINTEDO Dominique	Chargé de Cours	En poste
30	NGOMO Orléans	Chargée de Cours	En poste
31	OUAHOUE WACHE Blandine M.	Chargée de Cours	En poste
32	SIELINOUE TEDJON Valérie	Chargé de Cours	En poste
33	MESSI Angélique Nicolas	Assistant	En poste
34	MUNVERA MFIFEN Aristide	Assistant	En poste
35	NONO NONO Éric Carly	Assistant	En poste
36	OUETE NANTCHOUANG Judith Laure	Assistante	En poste
37	TCHAMGOUE Joseph	Assistant	En poste
38	TSAFFACK Maurice	Assistant	En poste
39	TSAMO TONTSA Armelle	Assistante	En poste
40	TSEMEUGNE Joseph	Assistant	En poste

#### 6- DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE (IN) (25)

1	ATSA ETOUNDI Roger	Professeur	<i>Chef Div. MINESUP</i>
2	FOUDA NDJODO Marcel Laurent	Professeur	<i>Chef Dpt ENS/Chef IGA. MINESUP</i>
3	NDOUNDAM René	Maître de Conférences	En poste
4	ABESSOLO ALO'O Gislain	Chargé de Cours	En poste
5	AMINOUE Halidou	Chargé de Cours	<i>Chef de Département</i>
6	DJAM Xaviera YOUH - KIMBI	Chargé de Cours	En Poste
7	DOMGA KOMGUEM Rodrigue	Chargé de Cours	En poste
8	EBELE Serge Alain	Chargé de Cours	En poste
9	KOUOKAM KOUOKAM E. A.	Chargé de Cours	En poste
10	MELATAGIA YONTA Paulin	Chargé de Cours	En poste
11	MONTHÉ DJIADEU Valéry M.	Chargé de Cours	En poste
12	MOTO MPONG Serge Alain	Chargé de Cours	En poste
13	OLLE OLLE Daniel Claude Delort	Chargé de Cours	Directeur adjoint Enset. Ebolowa
14	TAPAMO Hyppolite	Chargé de Cours	En poste
15	TINDO Gilbert	Chargé de Cours	En poste
16	TSOPZE Norbert	Chargé de Cours	En poste
17	WAKU KOUAMOU Jules	Chargé de Cours	En poste
18	BAYEM Jacques Narcisse	Assistant	En poste
19	EKODECK Stéphane Gaël Raymond	Assistant	En poste
20	HAMZA Adamou	Assistant	En poste
21	JIOMEKONG AZANZI Fidel	Assistant	En poste

22	MAKEMBE. S . Oswald	Assistant	En poste
23	MESSI NGUELE Thomas	Assistant	En poste
24	MEYEMDOU Nadège Sylvianne	Assistante	En poste
25	NKONDOCK. MI. BAHANACK.N.	Assistant	En poste

### 7- DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES (MA) (35)

1	AYISSI Raoult Domingo	Professeur	Chef de Département
2	EMVUDU WONO Yves S.	Professeur	<i>Inspecteur MINESUP</i>
3	KIANPI Maurice	Maître de Conférences	En poste
4	MBANG Joseph	Maître de Conférences	En poste
5	MBEHOU Mohamed	Maître de Conférences	En poste
6	MBELE BIDIMA Martin Ledoux	Maître de Conférences	En poste
7	NKUIMI JUGNIA Célestin	Maître de Conférences	En poste
8	NOUNDJEU Pierre	Maître de Conférences	<i>Chef service des programmes &amp; Diplômes/FS/UYI</i>
9	TCHAPNDA NJABO Sophonie B.	Maître de Conférences	Directeur/AIMS Rwanda
10	TCHOUNDJA Edgar Landry	Maître de Conférences	En poste
11	BOGSO ANTOINE MARIE	Chargé de Cours	En poste
12	AGHOUKENG JIOFACK Jean Gérard	Chargé de Cours	Chef Cellule MINPLAMAT
13	CHENDJOU Gilbert	Chargé de Cours	En poste
14	DJIADU NGAHA Michel	Chargé de Cours	En poste
15	DOUANLA YONTA Herman	Chargé de Cours	En poste
16	FOMEKONG Christophe	Chargé de Cours	En poste
17	KIKI Maxime Armand	Chargé de Cours	En poste
18	MBAKOP Guy Merlin	Chargé de Cours	En poste
19	MENGUE MENGUE David Joe	Chargé de Cours	En poste
20	NGUEFACK Bernard	Chargé de Cours	En poste
21	NIMPA PEFOUKEU Romain	Chargée de Cours	En poste
22	POLA DOUNDOU Emmanuel	Chargé de Cours	En poste
23	TAKAM SOH Patrice	Chargé de Cours	En poste
24	TCHANGANG Roger Duclos	Chargé de Cours	En poste
25	TETSADJIO TCHILEPECK M. E.	Chargé de Cours	En poste
26	TIAYA TSAGUE N. Anne-Marie	Chargée de Cours	En poste
27	BITYE MVONDO Esther Claudine	Assistante	En poste
28	FOKAM Jean Marcel	Assistant	En poste
29	LOUMNGAM KAMGA Victor	Assistant	En poste
30	MBATAKOU Salomon Joseph	Assistant	En poste
31	MBIAKOP Hilaire George	Assistant	En poste
32	MEFENZA NOUNTU Thiery	Assistant	En poste
33	OGADOA AMASSAYOGA	Assistant	En poste
34	TCHEUTIA Daniel Duviol	Assistant	En poste
35	TENKEU JEUFACK Yannick Léa	Assistant	En poste

### 8- DÉPARTEMENT DE MICROBIOLOGIE (MIB) (21)

1	ESSIA NGANG Jean Justin	Professeur	<i>Chef de Département</i>
2	NYEGUE Maximilienne Ascension	Professeur	<i>VICE-DOYEN / DSSE</i>
3	NWAGA Dieudonné M.	Professeur	En poste
4	ASSAM ASSAM Jean Paul	Maître de Conférences	En poste
5	BOYOMO ONANA	Maître de Conférences	En poste

6	KOUITCHEU MABEKU Epse KOUAM Laure Brigitte	Maître de Conférences	En poste
7	RIWOM Sara Honorine	Maître de Conférences	En poste
8	SADO KAMDEM Sylvain Leroy	Maître de Conférences	En poste
9	BODA Maurice	Chargé de Cours	En poste
10	BOUGNOM Blaise Pascal	Chargé de Cours	En poste
11	ESSONO OBOUGOU Germain G.	Chargé de Cours	En poste
12	NJIKI BIKOÏ Jacky	Chargée de Cours	En poste
13	TCHIKOUA Roger	Chargé de Cours	En poste
14	ESSONO Damien Marie	Assistant	En poste
15	LAMYE Glory MOH	Assistant	En poste
16	MEYIN A EBONG Solange	Assistante	En poste
17	MONI NDEDI Esther Del Florence	Assistante	En poste
18	NKOUDOU ZE Nardis	Assistant	En poste
19	SAKE NGANE Carole Stéphanie	Assistante	En poste
20	TAMATCHO KWEYANG Blandine Pulchérie	Assistante	En poste
21	TOBOLBAÏ Richard	Chargé de Cours	En poste

### 9. DEPARTEMENT DE PHYSIQUE(PHY) (44)

1	BEN- BOLIE Germain Hubert	Professeur	En poste
2	DJUIDJE KENMOE épouse ALOYEM	Professeur	En poste
3	EKOBENA FOU DA Henri Paul	Professeur	<i>Vice-Recteur. UN</i>
4	ESSIMBI ZOBO Bernard	Professeur	En poste
5	KOFANE Timoléon Crépin	Professeur	En poste
6	NANA ENGO Serge Guy	Professeur	En poste
7	NANA NBENDJO Blaise	Professeur	En poste
8	NDJAKA Jean Marie Bienvenu	Professeur	Chef de Département
9	NJANDJOCK NOUCK Philippe	Professeur	En poste
10	NOUAYOU Robert	Professeur	En poste
11	PEMHA Elkana	Professeur	En poste
12	TABOD Charles TABOD	Professeur	Doyen FS Univ/Bda
13	TCHAWOUA Clément	Professeur	En poste
14	WOAFO Paul	Professeur	En poste
15	ZEKENG Serge Sylvain	Professeur	En poste
16	BIYA MOTTO Frédéric	Maître de Conférences	DG/HYDRO Mekin
17	BODO Bertrand	Maître de Conférences	En poste
18	ENYEGUE A NYAM épouse BELINGA	Maître de Conférences	En poste
19	EYEBE FOU DA Jean sire	Maître de Conférences	En poste
20	FEWO Serge Ibraïd	Maître de Conférences	En poste
21	HONA Jacques	Maître de Conférences	En poste
22	MBANE BIOUELE César	Maître de Conférences	En poste
23	MBINACK Clément	Maître de Conférences	En poste
24	NDOP Joseph	Maître de Conférences	En poste
25	SAIDOU	Maître de Conférences	Chef de Centre/IRGM/MINRESI
26	SIEWE SIEWE Martin	Maître de Conférences	En poste
27	SIMO Elie	Maître de Conférences	En poste
28	VONDOU Derbetini Appolinaire	Maître de Conférences	En poste
29	WAKATA née BEYA Annie	Maître de Conférences	<i>Directeur/ENS/Uyi</i>
30	ABDOURAHIMI	Chargé de Cours	En poste
31	CHAMANI Roméo	Chargé de Cours	En poste
32	EDONGUE HERVAIS	Chargé de Cours	En poste

33	FOUEDJIO David	Chargé de Cours	Chef Cell. MINADER
34	MBONO SAMBA Yves Christian U.	Chargé de Cours	En poste
35	MELI'I Joelle Larissa	Chargée de Cours	En poste
36	MVOGO ALAIN	Chargé de Cours	En poste
37	OBOUNOU Marcel	Chargé de Cours	DA/Univ Inter Etat/Sangmalima
38	WOULACHE Rosalie Laure	Chargée de Cours	En poste
39	AYISSI EYEBE Guy François Valérie	Assistant	En poste
40	DJIOTANG TCHOTCHOU Lucie Angennes	Assistante	En poste
41	LAMARA Maurice	Assistant	En poste
42	OTTOU ABE Martin Thierry	Assistant	En poste
43	TEYOU NGOUPOU Ariel	Assistant	En poste
44	WANDJI NYAMSI William	Assistant	En poste

**10- DÉPARTEMENT DE SCIENCES DE LA TERRE (ST) (42)**

1	BITOM Dieudonné	Professeur	<i>Doyen / FASA / UDs</i>
2	FOUATEU Rose épouse YONGUE	Professeur	En poste
3	NDAM NGOUPAYOU Jules-Remy	Professeur	En poste
4	NDJIGUI Paul Désiré	Professeur	Chef de Département
5	NGOS III Simon	Professeur	En poste
6	NKOUMBOU Charles	Professeur	En poste
7	NZENTI Jean-Paul	Professeur	En poste
8	ABOSSOLO née ANGUE Monique	Maître de Conférences	<i>Vice-Doyen / DRC</i>
9	BISSO Dieudonné	Maître de Conférences	<i>Directeur/Projet Barrage Memve'ele</i>
10	EKOMANE Emile	Maître de Conférences	En poste
11	GANNO Sylvestre	Maître de Conférences	En poste
12	GHOGOMU Richard TANWI	Maître de Conférences	CD/Uma
13	MOUNDI Amidou	Maître de Conférences	<i>CT/ MINIMDT</i>
14	NGUEUTCHOUA Gabriel	Maître de Conférences	CEA/MINRESI
15	NJILAH Isaac KONFOR	Maître de Conférences	En poste
16	NYECK Bruno	Maître de Conférences	En poste
17	ONANA Vincent Laurent	Maître de Conférences	<i>Chef service Maintenance &amp; du Matériel/UYII</i>
18	TCHAKOUNTE J. épouse NUMBEM	Maître de Conférences	<i>Chef.cell / MINRESI</i>
19	TCHOUANKOUE Jean-Pierre	Maître de Conférences	En poste
20	TEMDJIM Robert	Maître de Conférences	En poste
21	YENE ATANGANA Joseph Q.	Maître de Conférences	<i>Chef Div. /MINTP</i>
22	ZO'O ZAME Philémon	Maître de Conférences	<i>DG/ART</i>
23	ANABA ONANA Achille Basile	Chargé de Cours	En poste
24	BEKOA Etienne	Chargé de Cours	En poste
25	ELISE SABABA	Chargé de Cours	En poste
26	ESSONO Jean	Chargé de Cours	En poste
27	EYONG JOHN TAKEM	Chargé de Cours	En poste
28	FUH Calistus Gentry	Chargé de Cours	<i>Sec. D'Etat/MINMIDT</i>
29	LAMILÉN BILLA Daniel	Chargé de Cours	En poste
30	MBESSE CECILE OLIVE	Chargée de Cours	En poste
31	MBIDA YEM	Chargé de Cours	En poste
32	METANG Victor	Chargé de Cours	En poste
33	MINYEM Dieudonné-Lucien	Chargé de Cours	CD/Uma
34	NGO BELNOUN Rose Noël	Chargée de Cours	En poste
35	NGO BIDJECK Louise Marie	Chargée de Cours	En poste

36	NOMO NEGUE Emmanuel	Chargé de Cours	En poste
37	NTSAMA ATANGANA Jacqueline	Chargé de Cours	En poste
38	TCHAPTCHET TCHATO De P.	Chargé de Cours	En poste
39	TEHNA Nathanaël	Chargé de Cours	En poste
40	TEMGA Jean Pierre	Chargé de Cours	En poste
41	FEUMBA Roger	Assistant	En poste
42	MBANGA NYOBE Jules	Assistant	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	9 (01)	13 (10)	13 (05)	05 (02)	<b>40 (18)</b>
BPA	15 (01)	11 (07)	16 (05)	8 (02)	<b>50 (15)</b>
BPV	07 (01)	9 (01)	8 (06)	07 (01)	<b>31 (9)</b>
CI	10 (01)	09 (02)	10 (02)	03 (0)	<b>32 (5)</b>
CO	6 (0)	21 (05)	05 (02)	08 (02)	<b>40 (9)</b>
IN	2 (0)	1 (0)	14 (01)	08 (01)	<b>25 (2)</b>
MAT	2 (0)	8 (0)	15 (01)	09 (02)	<b>34 (3)</b>
MIB	3 (0)	5 (03)	06 (01)	06 (02)	<b>20 (6)</b>
PHY	15 (0)	14 (02)	09 (03)	08 (03)	<b>46 (8)</b>
ST	7 (1)	15 (01)	18 (05)	02 (0)	<b>42 (7)</b>
<b>Total</b>	<b>76 (5)</b>	<b>106 (31)</b>	<b>114 (31)</b>	<b>64 (15)</b>	<b>360 (82)</b>

Soit un total de **360 (82)** dont :

- Professeurs **76 (5)**
- Maîtres de Conférences **106 (31)**
- Chargés de Cours **114 (31)**
- Assistants **64 (15)**

( ) = Nombre de Femmes **82**

## DEDICACE

✓ *À ma mère, DEBANDE Jeanne*

*Les mots me manquent pour te qualifier. Tout ce que j'aurais à dire ne saurait exprimer à fond tout le sacrifice et toute l'endurance que tu as consenti pour nous élever. Tu n'as jamais cessé de nous prodiguer des conseils pour le droit chemin et tes bénédictions nuits et jours. Je ne saurais jamais te remercier assez. Seul Dieu peut te gratifier de tout ce que tu as fait pour nous. Qu'il t'accorde longue vie, bonne santé et bonheur à nos côtés. AMEN!*

## *REMERCIEMENTS*

« Psaume 23 : Le Seigneur est mon berger, je ne manquerai de rien ». Il m'est agréable de rendre gloire à DIEU, le tout puissant pour ses bienfaits dans ma vie et particulièrement dans le cadre de cette thèse.

Ce travail a été réalisé au Laboratoire d'Hydrobiologie et Environnement de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I (Cameroun), au Laboratoire de L'Eau et de l'Environnement (LABEEN) de l'Université de N'Djaména au Tchad, et au Laboratoire de Bactériologie Générale de l'Institut de Recherche en Elevage pour le Développement (IREED) de N'Djaména au Tchad.

Un remerciement à l'endroit du Professeur ZEBAZE TOGOUET Serge Hubert, de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I, principal instigateur de ce travail, pour la confiance qu'il a bien voulu me faire en me proposant ce sujet. La pertinence de ses conseils, sa contribution scientifique déterminante dans l'encadrement de cette thèse, ses critiques et suggestions ont été des stimulateurs permanents qui ont permis la réalisation de ce travail. C'est ici l'occasion de vous rendre cet hommage, de vous dire combien de fois j'ai été séduit par votre rigueur scientifique ainsi que vos qualités humaines. Je tiens à vous remercier pour votre disponibilité constante et pour vos conseils si précieux. Veuillez accepter, cher encadreur, l'expression de mon admiration, ma profonde reconnaissance et mon grand respect.

Je remercie le Recteur de l'Académie du Sud-Ouest-Tchad, Maître de Conférences (CAMES), BAN-BO BEBANTO Antipas, pour sa disponibilité, sa confiance et son apport scientifique dans la réalisation de ce travail. Je lui exprime toute ma gratitude.

J'exprime toute ma gratitude à l'endroit du Chef de Département de Biologie et Physiologie Animales de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I, Professeur BILONG BILONG Charles Félix et à tous les enseignants pour la formation reçue, les encouragements et les conseils prodigués lors de l'accomplissement de ce travail. Particulièrement, je dis un immense merci aux Professeurs NOLA Moïse Chef du Laboratoire d'Hydrobiologie et Environnement, AJEAGAH Gideon AGHAINDUM, FOTO MENBOHAN Samuel, FOMENA Abraham et KEKEUNOU Sévilor dont les enseignements, les conseils scientifiques, le dynamisme, la simplicité et l'humour permanents ont été pour moi, des sources d'inspiration et d'encouragement.

À tout le personnel de l'Institut de Recherche en Elevage pour le Développement (IREED), particulièrement au Maître de Conférences (CAMES), KOUSSOU MIAN-LOUDANANG, et au Chef de Division Santé Animale, Dr NGANDOLO BONGO NARE, Maître de Recherche, pour leur contribution précieuse à ce travail, leur sympathie et leur solidarité à mon égard.

Je ne peux oublier les contributions respectives de Dr BINTOU ABDERAMAN Chef de Département de Chimie Appliquée à la Faculté des Sciences Exactes et Appliquées de l'Université de N'Djaména, et de Monsieur DJIMOUNTA NANGASSOUM, Chef de Laboratoire des Brasseries du Tchad à N'Djaména.

Je dis un grand merci à Madame TAMDI Odile, Monsieur AHMAT AL-TIDJANI HISSEIEN, Monsieur TEDEBAYE ROGOUM et Monsieur DINGAMNAEL Valentin pour l'aide apportée aux analyses physicochimiques et bactériologiques réalisées au Laboratoire de L'Eau et de l'Environnement de l'Université de N'Djaména et au Laboratoire de Bactériologie Générale de l'Institut de Recherche en Elevage pour le Développement (IREDD) de N'Djaména.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et mes chaleureux remerciements aux membres du Laboratoire d'Hydrobiologie et Environnement, plus spécialement à mes aînés les Docteurs MOGUE KAMDEM Gwladys, SAFIA MAHAMAT TAHIR, TUEKAM KAYO Raoul, ENAH DICKSON ACHU, ASI QUIGGLE ATUD, KENGNE TENKEU Janvier, pour le soutien dont ils ont su faire preuve à mon égard. Que les sieurs POUNTOUNGNIGNI OUMAROU Farikou, NGUIEMA Cédric Anicet, DZAVI Jean, MISDOMBAYE Lucien, trouvent dans ces quelques mots ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements.

Aux membres de ma dynamique et sympathique équipe de terrain, qui se sont montrés très disponibles tout au long de ce travail, je ne saurais oublier les souffrances endurées ensemble lors des descentes sur le terrain, les moments que nous avons dû passer dans l'eau et la boue, sous la pluie, en pleine nuit ; de tout cœur, je vous adresse un très grand merci.

Je remercie tous mes camarades de promotion, baptisée « CONCORDE », pour leurs aides multiformes.

Un merci très particulier à Monsieur ABDOULAYE NGARDIGUINA, Président du Conseil d'Administration de l'Office National des Médias Audiovisuels tchadiens (ONAMA), pour son soutien matériel, financier sans réserve et son encouragement.

Je remercie d'une part, ma très chère épouse, BASGA FOTO, qui m'a toujours encouragé et épaulé durant toutes ces années d'études et, d'autre part, mes enfants, TOGDJIM Majesté, MBAIHAMDENE Bonté, OYO-ALLAH Confirmé et ABDOULAYE DJEKADOM Béni pour leur patience. Merci à tous mes frères, sœurs, cousins, cousines et ami(es) pour leurs encouragements ; qu'ils soient remerciés. Grand merci au Commissaire de Police, SINGABE Benoît, à DJENGUEMDE Noé et à TOINGAR Samuel pour leurs aides et soutiens.

Enfin, que tous ceux qui de près ou de loin m'ont apporté une aide quelconque trouvent ici l'expression de mes sincères remerciements.

## SOMMAIRE

DEDICACE.....	x
REMERCIEMENTS .....	xi
SOMMAIRE .....	xiii
LISTE DES ABREVIATIONS.....	xv
LISTE DES FIGURES.....	xvii
LISTE DES TABLEAUX.....	xxi
LISTES DES ANNEXES.....	xxii
RESUME.....	xxiii
ABSTRACT .....	xxv
INTRODUCTION.....	1
<b>CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE.....</b>	<b>5</b>
I.1. GENERALITES SUR LES MILIEUX AQUATIQUES .....	6
I.1.1. Importance de l'eau .....	6
I.1.2. Eau potable .....	7
I.1.3. Sources d'approvisionnement en eau domestique.....	7
I.1.4. Origine des eaux souterraines.....	9
I.2. POLLUTION DE L'EAU.....	13
I.2.1. Définition.....	13
I.2.2. Pollution des eaux superficielles et souterraines .....	13
I.3. METHODES DE TRAITEMENT DE L'EAU DE CONSOMMATION .....	6
I.3.1. Filtration .....	6
I.3.2. Ébullition .....	6
I.3.3. Chloration.....	6
I.3.4. Solar disinfection (SODIS) .....	7
I.4. BIODIVERSITE DU MILIEU SOUTERRAIN.....	7
I.4.1. Adaptations au milieu souterrain.....	9
I.4.2. Rôle de la faune aquatique souterraine.....	9
I.4.3. Aperçu sur la faune souterraine aquatique .....	10
I.5. EVALUATION DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES .....	11
I.5.1. Caractérisation physicochimique .....	11
I.5.3. Évaluation basée sur la faune souterraine .....	14
I.5.4. Évaluation bactériologique.....	14

<b>CHAPITRE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES .....</b>	<b>23</b>
II.1. MATERIEL .....	24
II.1.1. Zone d'étude : Ville de Moundou .....	24
II.1.2. Stations d'échantillonnage .....	25
II.1.3. Caractéristiques climatiques de la zone d'étude .....	28
II.2. METHODES .....	35
II.2.1. Échantillonnage de l'eau et récolte de la stygofaune .....	35
II.2.2. Analyse des échantillons .....	35
II.2.3. Analyses statistiques des données .....	48
<b>CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSION .....</b>	<b>50</b>
III.1. RESULTATS.....	51
III.1.1. Caractéristiques morphométriques des puits étudiés.....	51
III.1.2. Caractéristiques physicochimiques des eaux souterraines .....	53
III.1.3. Caractéristiques bactériologiques des eaux souterraines.....	89
III.1.4. Diversité stygobiologique des eaux souterraines.....	101
III.2. DISCUSSION.....	131
III.2.1. Impact de l'hydromorphométrie des puits sur la qualité des eaux étudiés.	131
III.2.2. Impact physicochimique, bactériologique et risques sanitaires de la qualité des eaux étudiées .....	132
III.2.3. Faune souterraine et bio-indicateurs de la qualité des eaux des puits étudiées .....	139
<b>CONCLUSION, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>142</b>
CONCLUSION .....	143
RECOMMANDATIONS.....	144
PERSPECTIVES.....	145
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>146</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>177</b>
<b>PUBLICATION ISSUE DE LA THÈSE.....</b>	<b>202</b>

## *LISTE DES ABREVIATIONS*

<b>ACH</b>	: Analyse de Classification Hiérarchique
<b>ACP</b>	: Analyse en Composantes Principales
<b>AFD</b>	: Agence Française de Développement
<b>AFNOR</b>	: Agence Française de Normalisation
<b>ANAM</b>	: Agence Nationale pour la Météorologie
<b>ANOVA</b>	: Analysis of Variance
<b>APHA</b>	: American Public Health Association
<b>BCCA</b>	: Bureau de Coordination des Comité d'Assainissement
<b>CBLT</b>	: Commission du Bassin du Lac Tchad
<b>CEAEQ</b>	: Centre d'Expertise en Analyses Environnementales du Québec
<b>CNAR</b>	: Centre National de Recherche
<b>CNUED</b>	: Conférence des Nations-Unies sur l'Environnement et le Développement
<b>DREM</b>	: Direction des Ressources en Eau et de la Météorologie
<b>DSIS</b>	: Division du Système d'Information Sanitaire
<b>FAD</b>	: Fonds Africain de Développement
<b>FSEA</b>	: Faculté des Sciences Exactes et Appliquées
<b>GPS</b>	: Global Positioning System
<b>GWP</b>	: Global Water Partnership (Partenariat Mondial de l'Eau)
<b>EDTA</b>	: Acide Ethylène Diamine Tétracétique
<b>STE</b>	: Société Tchadienne des Eaux
<b>TH</b>	: Titre hydrotimétrique.
<b>EPA</b>	: Environmental Protection Agency (Agence de Protection de l'Environnement)
<b>FIT</b>	: Front Inter Tropical
<b>INC</b>	: Institut National de Cartographie
<b>INSEED</b>	: Institut National des Statistiques, des Etudes Economiques Démographiques
<b>ICWE</b>	: International Conference on Water and Environment
<b>IDH</b>	: Intermediate Disturbance Hypothesis
<b>IPCC</b>	: Intergovernmental Panel on Climate Change
<b>IPO</b>	: Indice de Pollution organique
<b>IQES</b>	: Indice de la Qualité d'Eau Souterraine

<b>IRED</b>	: Institut de Recherche en Élevage pour le Développement
<b>ISO</b>	: Organisme de Standardisation Internationale
<b>LABEEN</b>	: Laboratoire de l'Eau et de l'Environnement
<b>MEE</b>	: Ministère de l'Environnement et de l'Eau
<b>MEEP</b>	: Ministère de l'Environnement, de l'Eau et de la Pêche
<b>MES</b>	: Matières en Suspension
<b>MICS</b>	: Multiple Indicators Cluster Survey
<b>NF</b>	: Norme Française
<b>NTU</b>	: Nephelometric Turbidity Units
<b>OMD</b>	: Objectif du Millénaire pour le Développement
<b>OMS</b>	: Organisation Mondiale de la Santé
<b>PADUR</b>	: Projet d'Appui au Développement Urbain
<b>PASCALIS</b>	: Protocols for the Assessment and Conservation of Aquatic Life in the Subsurface
<b>PANGIRE</b>	: Projet d'Appui National pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau
<b>Pt.Co</b>	: Platinum Cobalt
<b>RéFEA</b>	: Réseau Francophone sur l'Eau et l'Assainissement
<b>RGPHT</b>	: Recensement Général de la Population et de l'Habitat du Tchad
<b>SDEA</b>	: Schéma Directeur de l'Eau et de l'Assainissement du Tchad
<b>SODIS</b>	: SOLar water DISinfection
<b>SMART</b>	: Standardized Monitoring and Assessment for Relief and Transitions
<b>SPSS</b>	: Statistical Packages for Social Sciences
<b>UE</b>	: Union Européenne
<b>UFC</b>	: Unité Format Colonie

## *LISTE DES FIGURES*

<b>Figure 1 :</b> Classification écologique des invertébrés souterrains aquatiques.....	8
<b>Figure 2 :</b> Emplacement des stations d'échantillonnage dans la ville de Moundou.....	27
<b>Figure 3 :</b> Diagramme ombrothermique de la période d'étude. ....	29
<b>Figure 4 :</b> Puits échantillonnés dans le 1 <sup>er</sup> arrondissement de la ville de Moundou .....	30
<b>Figure 5:</b> Puits échantillonnés dans le 2 <sup>e</sup> arrondissement de la ville de Moundou .....	31
<b>Figure 6:</b> Puits échantillonnés dans le 3 <sup>e</sup> arrondissement de la ville de Moundou.....	32
<b>Figure 7:</b> Puits échantillonnés dans le 4 <sup>e</sup> arrondissement de la ville de Moundou .....	34
<b>Figure 8:</b> Box plots présentant la variation spatiale des valeurs de température (A), de pH (B), de l'Alcalinité (C) et de la Dureté totale (D) des quatre arrondissements de la ville de Moundou au cours de l'étude.....	55
<b>Figure 9:</b> Box plots présentant la variation spatiale des valeurs de Turbidité (A), de Couleur (B), des MES (C) et en Conductivité électrique (D), des TDS (E) et des Matières organiques (F) des quatre arrondissements de la ville de Moundou au cours de l'étude. ....	57
<b>Figure 10:</b> Box plots présentant la variation spatiale des valeurs d'O <sub>2</sub> dissous (A), de CO <sub>2</sub> dissous (B), de DBO <sub>5</sub> (C) et de DCO (D) des quatre arrondissements de la ville de Moundou au cours de l'étude.....	58
<b>Figure 11:</b> Box plots présentant la variation spatiale des valeurs d'Ammonium (A), de Nitrites (B), de Nitrates (C) et d'Orthophosphates (D) des quatre arrondissements de la ville de Moundou au cours de l'étude.....	59
<b>Figure 12:</b> Box plots présentant la variation spatiale des valeurs de Sulfates (A), du Fer (B), du Bicarbonates (C) et du Fluor (D) des quatre arrondissements de la ville de Moundou au cours de l'étude.. ....	60
<b>Figure 13:</b> Variation saisonnière de la température dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. ....	61
<b>Figure 14:</b> Variation saisonnière de la turbidité dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou.....	62
<b>Figure 15:</b> Variation saisonnière des Matières En Suspension dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou.....	63
<b>Figure 16:</b> Variation saisonnière de la couleur dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. ....	64
<b>Figure 17:</b> Variation saisonnière du pH dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou.....	65

<b>Figure 18:</b> Variation saisonnière de l'alcalinité dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou.....	66
<b>Figure 19:</b> Variations saisonnière de la dureté totale dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou.....	67
<b>Figure 20:</b> Variations saisonnière de la conductivité électrique dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou.....	68
<b>Figure 21:</b> Variation saisonnière des Solides Totaux Dissous dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou.....	69
<b>Figure 22:</b> Variations saisonnière du pourcentage d'oxygène dissous dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. ....	70
<b>Figure 23:</b> Variation saisonnière du Dioxyde de carbone dissous dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. ....	71
<b>Figure 24:</b> Variation saisonnière de la Demande biochimique en oxygène pendant cinq jours dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. ....	72
<b>Figure 25:</b> Variation saisonnière de la Demande chimique en oxygène dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. ....	73
<b>Figure 26 :</b> Variation saisonnière de la matière organique dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou.....	74
<b>Figure 27:</b> Variation saisonnière des nitrates dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou.....	75
<b>Figure 28:</b> Variation saisonnière des nitrites dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. ....	76
<b>Figure 29:</b> Variation saisonnière d'ions ammonium dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou.....	77
<b>Figure 30:</b> Variation saisonnière d'orthophosphates dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou.....	78
<b>Figure 31:</b> Variation saisonnière de Sulfates dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou.....	79
<b>Figure 32 :</b> Variation saisonnière de Fer dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. ....	80
<b>Figure 33:</b> Variations saisonnière de Fluor dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. ....	81
<b>Figure 34:</b> Variation saisonnière de Bicarbonates dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou.....	82

<b>Figure 35:</b> Variation spatiale de l'Indice de la pollution Organique dans la ville de Moundou.....	83
<b>Figure 36 :</b> Variation saisonnière moyenne des valeurs de l'Indice de pollution Organique. ....	84
<b>Figure 37 :</b> ACP établie sur la base des paramètres physicochimiques étudiés dans la ville de Moundou.....	87
<b>Figure 38:</b> Projection des variables et représentation des observations des stations sur le plan factoriel (F1×F2).....	88
<b>Figure 39:</b> Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) des stations sur la base des valeurs des paramètres physique et chimiques .....	89
<b>Figure 40 :</b> Aspects des colonies sur différents types des milieux de culture utilisés. ....	89
<b>Figure 41:</b> Culture des souches pures de <i>Salmonella</i> spp (A) et des souches pures d' <i>Escherichia coli</i> (B) sur milieu Kligler-Hajna. ....	90
<b>Figure 42 :</b> Variation saisonnière de l'abondance de la Flore mésophile totale dans les eaux des puits des quatre arrondissements de la ville de Moundou au cours de l'étude.....	92
<b>Figure 43:</b> Variation saisonnière de l'abondance des Coliforme totaux dans les eaux de puits des quatre arrondissements de la ville de Moundou au cours de l'étude....	93
<b>Figure 44:</b> Variation saisonnière de l'abondance des Coliforme fécaux dans les eaux de puits des quatre arrondissements la ville de Moundou au cours de l'étude. ....	94
<b>Figure 45:</b> Variation saisonnière de l'abondance des <i>Staphylococcus aureus</i> dans les eaux de puits des quatre arrondissements de la ville de Moundou au cours de l'étude.....	95
<b>Figure 46 :</b> Variation saisonnière de l'abondance d' <i>Escherichia coli</i> dans les eaux de puits des quatre arrondissements la ville de Moundou au cours de l'étude. ....	96
<b>Figure 47:</b> Variation saisonnière de l'abondance de <i>Salmonella</i> spp. dans les eaux de puits des quatre arrondissements de la ville de Moundou au cours de l'étude....	97
<b>Figure 48 :</b> Projection des variables morphohydrométriques, physico-chimiques, bactériologiques et représentation des observations des stations sur le plan factoriel (F1×F2). ....	100
<b>Figure 49:</b> Distribution des différentes classes d'invertébrés récoltés dans les puits échantillonnés au cours de l'étude dans la ville de Moundou.....	101
<b>Figure 50:</b> Distribution des différentes familles des invertébrés récoltés dans les puits échantillonnés au cours de l'étude dans la ville de Moundou.....	102

<b>Figure 51:</b> Variation spatiale de la richesse spécifique (S) en invertébrés dans les puits étudiés dans la ville de Moundou.....	103
<b>Figure 52:</b> Variation saisonnière de la richesse spécifique en invertébrés dans les puits étudiés dans la ville de Moundou.....	103
<b>Figure 53:</b> Quelques invertébrés Collemboles identifiés au cours de l'étude.....	107
<b>Figure 54:</b> Quelques invertébrés Crustacés identifiés au cours de l'étude.....	108
<b>Figure 55:</b> Morphologie générale de <i>Metastenasellus</i> sp.....	112
<b>Figure 56:</b> Photos et schémas des Pléopodes de <i>Metastenasellus</i> sp du Tchad.....	113
<b>Figure 57:</b> Etude comparée du pléopodes 2 de <i>Metastenasellus</i> sp.....	115
<b>Figure 58 :</b> Variations spatiales de l'abondance relative des principaux ordres et embranchements de la faune souterraine récoltée au cours de l'étude.....	117
<b>Figure 59:</b> Abondances relatives saisonnières des Acariens et Arachnides récoltées sur l'ensemble des stations d'étude.....	121
<b>Figure 60:</b> Variation saisonnière de l'indice de Shannon (H') dans les stations d'échantillonnage.....	122
<b>Figure 61:</b> Variation saisonnière de l'indice d'équitabilité (J) dans les stations d'échantillonnage.....	123
<b>Figure 62 :</b> Projection des variables morphohydrométriques et fauniques sur le plan factoriel (F1×F2).....	125
<b>Figure 63 :</b> Projection des variables fauniques et les puits sur le plan factoriel (F1×F2).....	126
<b>Figure 64:</b> Projection des variables physicochimiques, fauniques et représentation des observations des stations sur le plan factoriel (F1×F2).....	128
<b>Figure 65:</b> Dendrogramme représentant la classification ascendante hiérarchique des 50 stations décrites par les variables physicochimiques et fauniques de l'eau des puits étudiée.....	129
<b>Figure 66:</b> Distribution spatiale des Stenasellidae en Afrique : .....	130

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I:</b> Synthèse des activités anthropiques sur les ressources en eau et solutions probables .....	14
<b>Tableau II :</b> Principaux groupes et genres d'agents pathogènes responsables de maladies d'origine hydrique .....	18
<b>Tableau III :</b> Effets sanitaires liés à quelques paramètres chimiques indésirables.....	5
<b>Tableau IV:</b> Variables organoleptiques de l'eau de boisson .....	13
<b>Tableau V:</b> Biotope naturel des coliformes.....	15
<b>Tableau VI:</b> Modes d'action des principales classes et molécules d'antibiotiques .....	19
<b>Tableau VII :</b> Caractéristiques des arrondissements et répartition des puits par quartier dans la ville de Moundou.....	26
<b>Tableau VIII :</b> Classes de l'IPO en fonction des valeurs limites de chaque paramètre.....	40
<b>Tableau IX:</b> Classification des niveaux de pollution en fonction des classes de valeurs de l'IPO.....	40
<b>Tableau X:</b> Statut de la qualité de l'eau basée sur IQES .....	42
<b>Tableau XI:</b> Identification d' <i>Escherichia coli</i> et de <i>Salmonella</i> spp. sur milieu Kligler-Hajna .....	45
<b>Tableau XII:</b> Coordonnées GPS et caractéristiques morphométriques et hydrologiques des différentes stations étudiées. ....	52
<b>Tableau XIII:</b> Valeurs moyennes et intervalles de confiance des différents paramètres physicochimiques mesurés dans les quatre arrondissements de Moundou au cours de l'étude.....	53
<b>Tableau XIV:</b> Détermination de l'Indice de Qualité des Eaux Souterraines (IQES) .....	85
<b>Tableau XV:</b> Répartition des souches par arrondissements .....	90
<b>Tableau XVI:</b> Puits ayant des valeurs normales et non conformes de l'abondance bactérienne selon les normes de l'OMS .....	91
<b>Tableau XVII:</b> Résistance des souches de <i>Salmonella</i> spp. et d' <i>Escherichia coli</i> aux antibiotiques pendant la saison des pluies. ....	98
<b>Tableau XVIII:</b> Résistance des souches de <i>Salmonella</i> spp et d' <i>Escherichia coli</i> aux antibiotiques pendant la saison sèche. ....	99
<b>Tableau XIX:</b> Liste des invertébrés identifiés dans les eaux des puits dans la ville de Moundou.....	104

## *LISTES DES ANNEXES*

<b>Annexe 1:</b> Caractéristiques physiques des puits échantillonnés.....	178
<b>Annexe 2:</b> Récapitulatif des valeurs minimales (Min), maximales (Max), moyennes (Moy) ± écart-types ( $\sigma$ ) des paramètres physicochimiques et bactériologiques mesurés pour l'ensemble des puits de Moundou pendant la période d'étude.....	180
<b>Annexe 3:</b> Valeurs saisonnières moyennes (Moy) ± écart-types ( $\sigma$ ) des paramètres physicochimiques et bactériologiques mesurés pendant la période d'étude par arrondissement.....	181
<b>Annexe 4:</b> Données saisonnières des paramètres bactériologiques mesurés pendant la période d'étude.....	185
<b>Annexe 5:</b> Valeurs des coefficients de corrélation de Pearson (n) entre les variables physicochimiques dans les eaux de puits de la ville de Moundou pendant la période d'étude.....	187
<b>Annexe 6:</b> Valeur des coefficients de corrélation de Pearson (n) entre les variables morphohydrologiques et physicochimiques dans les eaux de puits de la ville de Moundou pendant la période d'étude.....	188
<b>Annexe 7:</b> Valeurs des coefficients de corrélation de Pearson (n) entre les variables morphohydrologiques et bactériologiques et entre les variables bactériologiques dans les eaux de puits de la ville de Moundou pendant la période d'étude.....	188
<b>Annexe 8:</b> Valeur des coefficients de corrélation de Pearson (n) entre les variables physicochimiques et bactériologiques dans les eaux de puits de la ville de Moundou pendant la période d'étude.....	190
<b>Annexe 9:</b> Liste des organismes récoltés dans le 1 <sup>er</sup> arrondissement de la ville de Moundou .....	191
<b>Annexe 10:</b> Liste des organismes récoltés dans le 2 <sup>e</sup> arrondissement de la ville de Moundou .....	192
<b>Annexe 11:</b> Liste des organismes récoltés dans le 3 <sup>e</sup> arrondissement de la ville de Moundou .....	193
<b>Annexe 12:</b> Liste des organismes récoltés dans le 4 <sup>e</sup> arrondissement de la ville de Moundou .....	195
<b>Annexe 13:</b> Valeurs des coefficients de corrélation de Pearson (n) entre les variables morphohydrologiques et la faune souterraine et entre faune dans les eaux de puits de la ville de Moundou pendant la période d'étude.....	192
<b>Annexe 14:</b> Valeurs des coefficients de corrélation de Pearson (n) entre les variables physicochimiques et la faune souterraine dans les eaux de puits de la ville de Moundou pendant la période d'étude.....	198
<b>Annexe 15 :</b> Valeurs des coefficients de corrélation de Pearson (n) entre les variables bactériologiques et l'abondance de la Coliformes fécaux.....	200
<b>Annexe 16:</b> Quelques invertébrés récoltés dans les eaux des puits au cours de l'étude.....	201

## RESUME

L'impact humain sur les ressources en eau est de nos jours l'un des principaux enjeux mondiaux dans les zones urbaines, vus les dégâts égoïstes de l'homme quantitativement et qualitativement. Cette étude vise à évaluer l'impact de la pollution anthropique sur la qualité faunique et bactériologique des eaux souterraines de la ville de Moundou (Tchad) et les risques sanitaires encourus. Elle a été menée de mai 2019 à juillet 2020. De ce fait, 50 puits au total ont été choisis dans les quatre arrondissements de la ville de Moundou surtout en fonction de la taille de la population, l'accessibilité au site, l'utilité du puits et la proximité aux sources de pollution ; 4 campagnes de prélèvements ont été effectuées suivant une fréquence saisonnière. L'analyse des paramètres physicochimiques a montré que les eaux des puits de la ville de Moundou sont de très mauvaise qualité. Elles ont une température moyenne de  $28,77 \pm 0,7$  °C, des teneurs en matières en suspensions (MES) de  $35,28 \pm 42,32$  mg.L<sup>-1</sup>, une turbidité de  $13,92 \pm 12,61$  FTU, une conductivité électrique de  $1204,9 \pm 1125$  µS/Cm, une dureté totale de  $1502 \pm 1129$  mg.L<sup>-1</sup>, une demande biochimique en oxygène (DBO<sub>5</sub>) de  $151,45 \pm 48$  mg.L<sup>-1</sup> d'O<sub>2</sub>, et une demande chimique en oxygène (DCO) de  $526,92 \pm 284,70$  mg.L<sup>-1</sup> d'O<sub>2</sub>. L'Indice de Pollution Organique (IPO) calculé en utilisant les valeurs des paramètres indicateurs de pollution (DBO<sub>5</sub>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) a montré dans l'ensemble une pollution organique modérée des eaux des puits. Le calcul de l'Indice de la Qualité des Eaux Souterraines a rendu des valeurs > 100, ce qui indique aussi que ces eaux reçoivent des éléments exogènes pendant les deux saisons et sont d'une qualité impropre à la boisson. En saison pluvieuse, les eaux de puits de Moundou sont modérément contaminées par les bactéries, c'est-à-dire 68% de sites par *Staphylococcus aureus*, 34% par *Escherichia coli* et 20% par *Salmonella* spp. Les abondances bactériennes de la Flore mésophile aérobie totale, des Coliformes totaux et des Coliformes fécaux ont été non conformes aux normes de l'OMS pour les eaux destinées à la boisson. En saison sèche, la Flore mésophile aérobie totale, les Coliformes totaux, les Coliformes fécaux, les espèces *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* et *Salmonella* spp. colonisent abondamment tous les puits, et sont largement au-dessus de la norme recommandée par l'OMS (0 germe/mL) pour l'eau de boisson. Ces résultats obtenus sur la qualité physicochimique et bactériologique des eaux de puits de la ville de Moundou confirment à suffisance la dégradation de l'environnement autour de ces sites et leur mauvais état d'entretien, toutes choses qui coucourent à une forte contamination bactérienne. La topographie des quartiers constituerait également un facteur favorisant de cette de pollution ainsi que les comportements inadéquats des ménages face à l'évacuation des eaux usées domestiques et des déchets solides.

En saison pluvieuse les analyses bactériologiques ont montré une forte résistance bactérienne vis-à-vis de : la Ceftriaxone, soit 100% pour *Escherichia coli* et 87,5% pour *Salmonella* spp.; l'Ampicilline, soit 77,7% pour *Escherichia coli* et 75% pour *Salmonella* spp.; l'Amoxicilline + l'acide clavulanique, soit 55,5% pour *Escherichia coli* et 50% pour *Salmonella* spp. En saison sèche, un niveau de résistance bactérienne très élevé a également été noté vis-à-vis des bêta-lactamines, soit 100% à l'ampicilline, 66,6% à la l'Amoxicilline + acide clavulanique, et 33,3% à Amoxicilline sulbatans pour *Escherichia coli*. Cette résistance pour *Salmonella* spp. était de 88,8% à la Ceftriaxone, 50% à l'Amoxicilline et à l'Ampicilline, 38,8% à la l'Amoxicilline + acide clavulanique, et 33,3% à l'Amoxicilline+Sulbactam. Cependant, ces bactéries ont été sensibles à la Gentamicine à 100 % pendant les deux saisons. Ces eaux sont donc impropres à la consommation et font clairement courir de grands risques sanitaires à court terme à cette population. Concernant la stygofaune, au total 33388 organismes correspondant à 91 morphotypes ont été identifiés au rang de la famille. Ces taxa se répartissent dans 3 embranchements (Arthropodes, Mollusques, Annélides) et 7 classes (Arachnida, Crustacea, Enthognata, Insecta, Oligocheta, Gasteropoda et Myriapoda). L'analyse du peuplement souterrain a montré que cette faune stygobiontiques est négativement affectée par la pollution de l'eau. Ainsi, ces organismes apparaissentt comme de bons indicateurs de la qualité de l'eau. Cette étude a signalé pour la première fois, la présence de crustacés du genre *Metastenasellus* au Tchad et élargi ainsi l'aire de distribution de ces organismes.

**Mots clés :** Qualité d'eau, physicochimie, Bactériologie, faune souterraine, puits, indicateurs de la qualité de l'eau.

## ABSTRACT

The human impact on water resources is nowadays one of the main global issues in urban areas, given the selfish damage of man by their quantitative and qualitative degradation. This study aims at assessing the impact of anthropogenic pollution on the faunistic and bacteriological quality of groundwater in the City of Moundou (Chad) and health risks. It was carried out from May 2019 to July 2020. As a result, a total of 50 wells were chosen in four districts of Moundou according to criteria, of which the most important were: the number of populations, the accessibility, the usefulness of the wells and their proximity to sources of pollution in 4 sampling campaigns following a seasonal frequency. The analyses of the physicochemical parameters showed that water in wells of Moundou were of very poor quality. These waters have average Temperature levels ( $28.77 \pm 07^{\circ}\text{C}$ ), Suspended Solids (SS) of  $35.28 \pm 42.32 \text{ mg.L}^{-1}$ , a Turbidity of  $13.92 \pm 12.61 \text{ FTU}$ , an Electrical Conductivity of  $1204.9 \pm 1125 \mu\text{S/Cm}$ , a Total Hardness of  $1502.1 \pm 1129 \text{ mg.L}^{-1}$ , a Biochemical Oxygen Demand ( $\text{BOD}_5$ ) of  $151.45 \pm 48 \text{ mg.L}^{-1}$  of  $\text{O}_2$ , and a Chemical Oxygen Demand (COD) of  $526.92 \pm 284.70 \text{ mg.L}^{-1}$  of  $\text{O}_2$ . The Organic Pollution Index (IPO) obtained by using the results of analyses of the pollution indicator parameters ( $\text{BOD}_5$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{PO}_4^{3-}$ ) indicated low and mostly moderate organic pollution of the well water studied. The results of Groundwater Quality Index (IQES > 100) indicate that these wells waters were influenced by exogenous inputs and were unsuitable quality for drinking during both seasons. During the rainy season, well water was moderately contaminated with bacteria. According to the bacteria load they were, 68% contaminated with *Staphylococcus aureus*, 34% with *Escherichia coli* and 20% with *Salmonella* spp. The bacterial abundances of Total Aerobic Mesophilic Flora, Total Coliforms and Faecal Coliforms were not in accordance with WHO standards (2011) for drinking water. During the dry season, Total Aerobic Mesophilic Flora, Total Coliforms, Faecal Coliforms, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* and *Salmonella* spp. were present in high abundance volume in all wells assessed. However, their abundance were well above the standards recommended by the WHO (0 germs/mL) for drinking water. These results obtained on the physicochemical and bacteriological quality of well water at Moundou sufficiently confirm the degradation of the environment around these wells and their poor state of maintenance, which would be the basis of strong bacterial contamination. The topography of the neighborhoods would also be an aggravating factor due to inadequate household behavior regarding the disposal of domestic wastewater and solid waste. In the rainy season, resistance and susceptibility tests showed an increase in resistance to Ceftriaxone, with 100% for *Escherichia*

*coli* and (87.5%) for *Salmonella* spp. to Ampicillin, with 77.7% for *Escherichia coli* and 75% for *Salmonella* spp. to Amoxicillin + clavulanic acid, with 55.5% for *Escherichia coli* and 50% for *Salmonella* spp. During the dry season, a very high level of bacterial resistance was also noted against beta-lactams. It was 100% with ampicillin, 66.6% with amoxicillin + clavulanic acid and 33.3% with amoxicillin sulbatans for *Escherichia coli*. On the other hand, this resistance amounted to 88.8% to Ceftriaxone, 50% to Amoxicillin and Ampicillin, 38.8% to Amoxicillin + clavulanic acid, and 33.3% to Amoxicillin+Sulbactam for *Salmonella* spp. However, *Escherichia coli* and *Salmonella* spp. were 100% sensitive to Gentamicin in both seasons. These waters are therefore unfit for consumption and clearly pose a significant short-term health risk for this population. Concerning the stygofauna, a total of 33,388 organisms corresponding to 91 morphotypes were identified at family rank, distributed into 3 phyla (Arthropoda, Mollusca and Annelida) and 7 classes (Arachnida, Crustacea, Enthognata, Insecta, Oligochaeta, Gasteropoda and Myriapoda). The analysis of the underground population showed the significant absence of the abundance of the stygobiotic organisms in case of the water pollution of wells. Thus, these stygobiont organisms appear to be good indicators of water quality. This study reported for the first-time crustaceans of the genus *Metastenasellus* in Chad and expanded the biogeographic range of this organism.

**Keywords:** Water quality, physicochemistry, bacteriology, underground fauna, wells, water quality indicators.



# **INTRODUCTION**

L'eau est une ressource naturelle, vitale, importante et précieuse (Hounsounou, 2016). Tout homme, quelles que soient ses conditions de vie ou ses ressources, a le droit de boire une eau saine. L'eau a de ce fait été placée au centre de toutes les préoccupations et a été consacrée ressource limitée, vulnérable, indispensable à l'environnement, au développement, et essentielle à la vie. Cette ressource doit être considérée comme un trésor naturel faisant partie de l'héritage commun de l'humanité et, par conséquent, un bien qui doit demeurer sous contrôle (OMS, 2004). La quantité d'eau douce sur terre est insuffisante pour répondre aux besoins de l'humanité (Gevaert, 2003). Cette ressource planétaire tend à se raréfier et est très inégalement distribuée à l'échelle de la réserve en eau. Déjà, certains pays d'Afrique et d'Asie Mineure manquent d'eau en quantité et en qualité ; à plus long terme, certaines parties de l'Asie et de l'Amérique latine, voire de l'Europe, connaîtront le même problème (OMS, 2004). Le nombre de personnes dont le droit à l'eau n'est pas satisfait est encore très important et avoisine probablement les 3,5 milliards (Onda *et al.*, 2012). L'ONU-EAU prévoit qu'en 2025, 1,8 milliard d'êtres humains vivront dans des pays ou régions affectés par une pénurie d'eau et environ 5 milliards dans des régions où il sera difficile de répondre à tous les besoins en eau. De plus d'ici à 2030, il manquera à l'humanité 40% de l'eau dont elle aura besoin. Cette situation, selon l'ONU-EAU (2021), sera encore aggravée par les grands bouleversements mondiaux comme le COVID-19 ou les changements climatiques. Ainsi, l'essor démographique et la hausse des niveaux de vie que va connaître notre planète dans les 25 prochaines années s'accompagneront nécessairement d'une explosion de l'utilisation de l'eau alors qu'il faudra également préserver les milieux naturels (ONU-EAU, 2021).

La protection des milieux aquatiques est devenue une préoccupation mondiale en raison des nombreux enjeux mis en cause, qui sont d'ordres écologique (préservation des espèces), socioéconomique (aires de récréation) et sanitaire (captage d'eau potable) (APPEL, 2014). De nombreux textes et lois ont ainsi été élaborés pour préserver les écosystèmes fragiles que sont les lacs, les cours d'eau et les eaux souterraines. Malgré l'existence de législations environnementales, la pression anthropique telle que les paramètres physico-chimique et biologique perturbent l'équilibre naturel, parfois jusqu'à présenter un risque pour la santé humaine (Dansou *et al.*, 2015). Dans ces conditions, des programmes de suivi de la qualité de l'eau doivent être mis en place pour surveiller certains paramètres clés de la pollution, identifier les causes possibles de contamination et envisager des solutions pour en réduire l'impact (Balloy *et al.*, 2019). On peut ajouter aujourd'hui la problématique de la gestion des déchets solides et liquides qui constitue un des défis majeurs en termes d'assainissement (Daccache *et al.*, 2016 ; OMS/UNICEF, 2019).

C'est le cas dans la plupart des pays en voie de développement où les problèmes majeurs auxquels les responsables communaux des grandes villes africaines doivent constamment faire face sont ceux liés à la gestion durable des déchets urbains et à l'accès à un système d'assainissement adéquat (Aissata *et al.*, 2010 ; Soro *et al.*, 2010). En l'absence d'une collecte efficace, on observe une augmentation de l'insalubrité en milieu urbain et rural et un risque pour la santé des populations (Miquel, 2003). Par ailleurs, l'industrialisation, l'utilisation non rationnelle des engrais et pesticides, et le manque de sensibilisation de la population pour la protection de l'environnement, conduisent à une dégradation de la qualité des eaux, une baisse de la biodiversité et, à long terme, à une disparition des plans d'eau (Mullis *et al.*, 1997; Zébazé Togouet *et al.*, 2011). Ces pollutions ne sont pas sans risque pour les populations riveraines du fait d'une persistance de l'exposition aux polluants qui peuvent migrer vers les eaux superficielles ou souterraines responsables d'une dégradation de la ressource en eau potable (Host *et al.*, 2014); ceci affecte durablement les populations vulnérables et démunies des quartiers défavorisés (Sy *et al.*, 2011). Il est alors impératif, pour toute politique de conservation, d'utilisation durable et rationnelle des écosystèmes, d'évaluer l'état de santé des milieux (Chiné, 2015). Les analyses physicochimiques et microbiologiques, couplées à l'étude de la structure des peuplements de la faune souterraine intégrant les sites de référence, constituent de nos jours un excellent outil d'évaluation de l'impact des activités anthropiques sur la qualité écologique des milieux lotiques et souterrains (Zébazé Togouet *et al.*, 2011)

En Afrique, très peu de travaux ont été consacrés à la perte de la biodiversité souterraine en relation avec la dégradation du milieu (Boulal *et al.*, 2017). Pourtant, ces espèces sont des descripteurs biologiques par excellence et de bons indicateurs de la qualité des milieux aquatiques souterrains (Aït Boughrous, 2007). De plus, elles sont composées d'espèces sédentaires présentant des sensibilités variables aux différents stress environnementaux (Colas *et al.*, 2014). Au Tchad en général, et à Moundou en particulier, la plupart des études hydrobiologiques ont été consacrées essentiellement aux eaux de surface. Ces travaux ont montré une faible qualité des eaux et une faune aquatique assez diversifiée (Tchadanaye, 2007 ; Massang *et al.*, 2015 ; Ahmat al-Tidjani *et al.*, 2015 ; Safia, *et al.*, 2020 et Safia, 2021). Très peu de données sont disponibles sur la diversité, la structure et l'écologie de la communauté des milieux aquatiques souterrains, qui ont une importance capitale dans l'étude épidémiologique en rapport avec la santé des populations consommatrices de ces eaux (Dionkas, 2015 ; Maoudombaye *et al.*, 2016). De plus, l'impact réel des rejets urbains et industriels sur la stygofaune et les organismes microbiologiques reste à déterminer.

La présente étude a pour objectif principal d'évaluer l'impact de la pollution anthropique sur la qualité faunique et floristique des eaux souterraines de la ville de Moundou (Tchad) et d'en déterminer les risques sanitaires. A terme, ce travail vise à constituer une base de données sur la faune aquatique souterraine du Tchad, qui permette d'orienter les prises de décisions par les pouvoirs publics et les acteurs de développement. Les objectifs spécifiques assignés à ce travail consistent à :

- déterminer les paramètres hydromorphométriques des puits, la qualité physicochimique et bactériologique de leurs eaux ;
- inventorier les organismes de la faune et de la microflore peuplant ces milieux aquatiques souterrains ;
- Rechercher les corrélations entre les paramètres hydromorphométriques, physicochimiques d'une part et bactériologiques des eaux échantillonnées d'autre part ;
- établir une approche biotypologique et abiotique à partir des paramètres physicochimiques et biologiques.

Ce document s'articule autour de trois chapitres dont le premier est consacré à la revue de la littérature. Le deuxième chapitre traite du matériel et des méthodes utilisés pour la réalisation de cette étude. La présentation des résultats obtenus, leur interprétation et la discussion qui en découle font l'objet du troisième chapitre. Une conclusion, des recommandations et des perspectives de recherche clotent cette thèse.



# **CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE**

## I.1. GENERALITES SUR LES MILIEUX AQUATIQUES

### I.1.1. Importance de l'eau

L'eau est un élément fondamental à la vie et recouvre 72% de la surface de la terre. Elle représente le constituant inorganique le plus abondant dans la matière vivante. L'eau est un liquide incolore, inodore, transparent et insipide, lorsqu'elle est pure. On dit qu'elle est source de vie, vue l'importance qu'elle occupe à l'instar des autres éléments indispensables à l'alimentation et aux besoins physiologiques de l'homme (N'Diaye, 2008).

L'eau possède, grâce à ses propriétés physicochimiques, d'excellentes qualités de solvant et, à ce titre, représente un important moyen de transport d'espèces dissoutes, de microparticules ou de microorganismes (MSTP, 2007).

La composition d'une eau issue du milieu naturel est très variable selon la couche géologique d'où elle provient et les substances chimiques réactives qu'elle est susceptible de rencontrer (Blum *et al.*, 2002). Ainsi, lors de sa circulation dans le sol ou à la surface de la terre, l'eau se pollue et se charge de matières en solution (substances minérales ou organiques dissoutes) ou en suspension : particules d'argile, déchets de végétation, organismes vivants, sels divers, matières organiques. Ces particules sont caractérisées par des surfaces d'échange variables tant en nature qu'en intensité (Yao *et al.*, 2012).

Selon le parcours et le milieu traversé, les eaux contiennent beaucoup de matières minérales dissoutes sous forme ionique ; on peut citer les ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), sodium ( $\text{Na}^+$ ), potassium ( $\text{K}^+$ ), carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ), sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) et nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) (Rodier *et al.*, 2009). Ils proviennent pour l'essentiel du lessivage des sols par les eaux de pluie et de ruissellement. La teneur en matières minérales dissoutes peut varier du milligramme par litre, pour les eaux classées douces, à plusieurs grammes par litre, pour les eaux saumâtres des mers ou océans. Ces matières minérales peuvent aussi résulter de l'activité humaine au travers de rejets non contrôlés dans l'environnement ; ce sont par exemple des ions nitrates susceptibles de provenir d'exploitations agricoles ou d'activités industrielles (Emetere & Oladimeji, 2019).

En situation de ruissellement, l'eau contribue au mécanisme d'érosion de l'écorce terrestre et, de ce fait, elle peut également contenir des matières minérales en suspension, par exemple des matériaux argileux ou limons. Les eaux peuvent aussi contenir des matières organiques ; celles-ci sont alors présentes soit sous forme dissoute (les solvants), soit en suspension (cas des déchets végétaux ou du plancton). Ces composés proviennent pour l'essentiel de la dégradation de la matière organique présente dans le milieu naturel ou dans les sols lessivés par les pluies, suite à la décomposition de la matière biologique constitutive

des plantes et animaux, mais aussi de composés issus de l'activité humaine (Kholtei *et al.*, 2003). La qualité d'une eau est définie par des paramètres physiques, chimiques et biologiques, également par son usage. Sa pollution peut être d'origine naturelle ou anthropique (Rodier *et al.*, 2009).

### **I.1.2. Eau potable**

Une eau est dite potable quand sa consommation par l'homme est sans risque. Elle doit être exempte de contaminants microbiologiques, et son niveau de contaminants chimiques ne doit pas être dommageable pour la santé (OMS, 2011). Cette eau en effet doit être agréable à boire et ne doit renfermer en quantité ni substances chimiques, ni germes nocifs pour la santé. Elle ne doit contenir certaines substances ; il s'agit de substances indésirables ou toxiques telles que les métaux lourds ou encore les hydrocarbures et les pesticides (OMS, 1986 ; PNUD, 1990).

### **I.1.3. Sources d'approvisionnement en eau domestique**

Une source d'approvisionnement en eau est un lieu ou un ouvrage à partir duquel un ménage se ravitaille, s'approvisionne en eau pour son usage domestique quotidien (OMS/UNICEF, 2008). Cet approvisionnement en eau est assuré par les eaux de surface (rivières, fleuves, lacs, mares, barrages), les eaux souterraines (puits, forages, sources) et les eaux de pluies (Aubry & Gaüzère, 2012).

#### **I.1.3.1. Eaux de surface (milieux lotiques)**

Les eaux de surface regroupent toutes celles qui sont en mouvement : sources, torrents, ruisseaux, rivières, fleuves ; elles constituent un vaste réseau hydrographique qui mène à la mer. Ce sont des milieux ouverts présentant des échanges constants avec les systèmes qu'ils traversent (Genin, 2003). Les eaux de surface ont une qualité plus ou moins régulière selon les rejets qui s'y déversent ou encore selon le ruissellement des eaux des pluies (Coulibaly, 2005). Elles ont l'avantage de la quantité mais l'inconvénient majeur d'être fortement chargées en matières en suspension, voire en éléments pathogènes ; ceci nécessite des traitements souvent complexes et onéreux pour les rendre potables pour des usages domestiques (PS-eau, 2012). Les eaux de surface possèdent un pouvoir autoépurateur du fait de leur renouvellement permanent par l'amont ; ainsi, une eau courante n'a pas de mémoire (Grosclaude, 1999).

La pollution des cours d'eau s'est amplifiée au fil du temps (Chaguer, 2013). Les eaux de surface ne sont consommées directement que dans les zones rurales, en absence d'adduction d'eau publique, ou lorsque les forages sont hors service. Souvent, elles sont

utilisées soit pour la lessive, la vaisselle, la toilette, la cuisine, soit pour la boisson (Chippaux *et al.*, 2002 ; Yélognissè, 2007 ; Agassounon *et al.*, 2014).

#### **I.1.3.2. Eaux stagnantes (milieux lenticques)**

Les eaux stagnantes sont caractérisées par un courant de vitesse nul ou presque, et correspondent essentiellement aux lacs, étangs, mares et flaques. Elles se différencient par la superficie, l'ensoleillement et le réchauffement du fond (Genin, 2003). Une eau stagnante favorise la sédimentation des particules en suspension et limite l'oxygénation des strates profondes (Grosclaude, 1999).

#### **I.1.3.3. Eaux souterraines**

Le milieu souterrain se compose d'une multitude de biotopes de structures différentes (grotte, tunnel de lave, réseau de fissures, remplissage de type interstitiel...) ; il peut être défini comme l'ensemble des cavités qui répondent aux caractéristiques suivantes : absence de lumière permanente (et donc de photopériode), très faible amplitude des variations thermiques, chaîne trophique courte et humidité relative proche de la saturation (Juberthie & Decu, 1994).

Les eaux souterraines sont des ressources privilégiées pour l'eau potable car elles sont plus à l'abri des polluants que les eaux de surface (Guergazi & Achour, 2005) ; ce sont les eaux des nappes, des couches de terrains perméables saturées d'eau. Il peut exister des nappes plus profondes, généralement captives (sous pression) situées à plus de 50 mètres de profondeur.

#### **I.1.3.4. Approvisionnement en eau de consommation**

Les différents types d'approvisionnement en eau de consommation décrits ci-dessus (puits, forages et sources aménagées) constituent les moyens courants de desserte en eau de consommation en cas de déficit du réseau d'eau potable dans la plupart des pays en développement (Odoulami, 2009 ; Degbey *et al.*, 2010 ; Ahoudi *et al.*, 2015 ; Soncy *et al.*, 2015).

##### **I.1.3.4.1. Eaux des réseaux de distribution publique**

Les eaux des réseaux de distribution publique sont produites à partir soit des eaux souterraines (sources ou forages), soit des eaux superficielles provenant de pompes directes dans des cours d'eau, des canaux, des lacs ou des étangs. Après traitement, elles sont envoyées dans le réseau de distribution pour arriver aux robinets des consommateurs. Les

points de distribution de cette eau sont les robinets publics (bornes fontaines) et des robinets domiciliaires (branchements privés installés par les ménages) (PS-eau, 2012).

Les populations à bas revenus qui résident dans les quartiers précaires n'ont pas les moyens d'installer ces branchements à domicile (Mpakam *et al.*, 2009). L'eau de distribution est le produit alimentaire le plus contrôlé ; sa qualité est en général satisfaisante et répond à des exigences sanitaires réglementaires (Mfonka *et al.*, 2015).

#### **I.1.3.4.2. Eaux de pluies**

L'eau de pluie représente une option parallèle à d'autres sources d'approvisionnement en eau, surtout dans les zones rurales mais également de plus en plus dans les zones urbaines. Les eaux de pluies peuvent être collectées dans des citernes à partir des toitures des maisons. Pour le stockage de l'eau à très petite échelle, dans les pays en de développement, des cuvettes, des seaux en plastique, des pots en terre ou en céramique, de vieux barils de pétrole ou des récipients alimentaires vides sont utilisés. C'est une pratique qui existe depuis des siècles (Worm & Hattum, 2006). L'eau de pluie sert à divers usages domestiques dans les périodes de pénurie mais aussi pendant la saison des pluies. Cependant, ce système a quelques inconvénients liés à la qualité de ce liquide qui peut être affectée par la pollution de l'air, les déjections d'animaux ou d'oiseaux, des insectes, la saleté et la matière organique en l'absence d'entretien des toitures. L'approvisionnement en eau devient problématique par de longues périodes de sécheresse (Worm & Hattum, 2006) ; il en découle que le recours à l'eau de pluie est une pratique non permanente ou provisoire d'approvisionnement en eau domestique.

#### **I.1.4. Origine des eaux souterraines**

Les eaux souterraines ou aquifères souterrains sont celles qui se trouvent sous le niveau du sol et qui remplissent soit les fractures du socle rocheux, soit les pores présents dans les milieux granulaires tels les sables et les graviers (Ginet & Decou, 1977). Selon Banton & Bangoy (1997), l'origine des eaux souterraines a suscité l'élaboration de plusieurs théories parmi lesquelles : la théorie d'infiltration des eaux météoriques, celle de condensation de la vapeur d'eau dans le sol, celle des eaux reliques, enfin celle de la perte des cours d'eau superficiels.

La théorie d'infiltration des eaux météoriques suggère que les eaux souterraines résultent de l'infiltration des eaux pluviales à travers les sols et les fissures des roches. La vitesse d'infiltration est alors fonction de la perméabilité et de la porosité du matériau géologique traversé (Duchanfour, 1997). L'infiltration des eaux est rapide dans les sols constitués de gravier et de sable, et lente dans les sols argileux et limoneux (Castany, 1992).

Cette théorie explique l'existence des eaux dans les profondeurs du sol des régions sableuses ; toutefois elle trouve sa limite dans la mesure où certains déserts ne reçoivent pas de pluies régulièrement.

La théorie de la condensation de la vapeur d'eau dans le sol stipule que les eaux souterraines proviennent de la vapeur d'eau et autres émanations gazeuses dans les profondeurs du sol qui, en s'élevant vers les couches superficielles, se condensent en générant de l'eau. La limite de cette théorie est qu'il s'agit de quantités d'eau relativement infimes, n'étant pas impliquées dans le cycle de l'eau (Ginet & Decou, 1977).

La théorie des eaux reliques proclame que les eaux souterraines résiduelles des bassins anciens des zones profondes ont été enterrés dans des terrains de remblaiement et ont conservé leur aspect primitif jusqu'à l'époque actuelle.

La théorie de perte des cours d'eau superficiels attribue la formation des eaux souterraines à un abandon de la totalité ou d'une partie des cours d'eau de surface, dû à des fissures existant dans leur lit.

#### **I.1.4.1. Fonctionnement d'une nappe**

L'eau de pluie infiltrée dans le sous-sol est une quantité plus ou moins importante qui circule dans les pores et les microfissures de certaines roches appelés aquifères ou littéralement roches qui contiennent de l'eau. Ces aquifères sont souvent composés de deux parties : l'une non saturée en eau et située en surface, l'autre saturée en eau, et située en profondeur. La première nappe rencontrée sous le sol est la nappe phréatique située à moins de 50 mètres de profondeur ; elle est généralement séparée de la surface par quelques couches de terrains perméables (Delloye & Rentier, 2005). Dans la zone de la nappe phréatique, l'eau qui ne remplit pas l'intégralité des pores de la roche est en perpétuel mouvement. Elle est en effet soumise (1) aux forces de capillarité qui tendent à faire remonter l'eau vers la terre végétale agissant comme un buvard, et (2) à la pesanteur qui l'attire en profondeur. Une partie de cette eau descend donc par percolation vers les couches les plus profondes, jusqu'à rencontrer une couche imperméable, qui est le « mur » de la nappe, au-dessus de laquelle commence la zone saturée où l'eau pénètre dans tous les interstices de la roche et dans tous les vides possibles. La nappe est renfermée dans cette deuxième zone.

L'eau s'y écoule dans le sous-sol sur une couche imperméable en suivant le plus souvent la topographie, parfois sur des dizaines voire des centaines de kilomètres. Une nappe est ainsi toujours en mouvement vertical et latéral. L'eau souterraine peut ressurgir à la surface du sol, en formant une source, souvent à l'origine d'un cours d'eau dans des secteurs topographiquement plus bas que leur zone d'alimentation (Vilagines, 2003).

Quand l'eau d'une nappe circulant dans le sous-sol se trouve piégée sous une couche imperméable, on parle alors de nappe captive ; elle est en général profonde (quelques centaines de mètres et plus). Ce type d'aquifère comprend uniquement une zone saturée et l'eau s'y trouve la plupart du temps sous pression. Cette eau est libérée par un forage qui perce la couche imperméable, elle peut jaillir en surface par artésianisme puisque son niveau est au-dessus du sol.

La première nappe rencontrée sous la surface du sol est en général libre. Il s'agit d'une nappe phréatique car c'est celle qui est captée par les puits. Les roches aquifères diffèrent selon la nature géologique des terrains qui les composent et peuvent être libres ou captives (Vilagines, 2003). Ainsi on distingue trois catégories d'aquifères :

- les aquifères sédimentaires composés de roches sédimentaires (calcaires, sables, grès, craie). Ces nappes sont libres ou captives ;
- les aquifères alluviaux formés de sables et de graviers ; ils sont en relation avec les cours d'eau et sont le plus souvent libres ;
- les aquifères de socle ; ils sont composés de roches cristallines (granite, gneiss, etc.) et volcaniques (laves). Ils conservent l'eau dans les fissures et les zones altérées (arènes). Ils donnent localement naissance à de petites nappes libres.

Les aquifères sont caractérisés par leurs capacités à stocker l'eau (porosité, emmagasinement) et à la mobiliser (perméabilité) ; ces deux paramètres permettent de mesurer leur productivité (Kevin, 2012).

#### **I.1.4.2. Différents types d'eaux souterraines**

Les eaux souterraines sont subdivisées en plusieurs catégories selon que leur partie supérieure est libre ou recouverte d'une couche de terrain imperméable.

##### **I.1.4.2.1. Nappes libres ou phréatiques**

Les nappes libres ou phréatiques sont des nappes d'eaux souterraines dont le niveau piézométrique, peu profond, s'établit uniquement en fonction de la perméabilité du terrain à travers lequel pénètre l'eau d'infiltration. Ces eaux sont tributaires des variations pluviométriques et sont les plus exposées aux pollutions de toute nature (Boutin, 1993).

##### **I.1.4.2.2. Nappes captives**

Les nappes captives ou géologiques sont presque à l'abri de toute pollution (ou presque) et leur volume d'eaux varie peu. Ces grandes profondeurs limitent au maximum les pollutions diverses grâce à l'épuration du sol (Tuékam Kayo, 2007).

### **I.1.4.2.3. Résurgence des eaux souterraines**

L'eau souterraine peut ressurgir à la surface du sol en formant une source (souvent à l'origine d'un cours d'eau) ou encore peut être mise en évidence au travers des puits et forages dans des secteurs topographiquement plus bas que leur zone d'alimentation.

#### **I.1.4.2.3.1. Sources**

Une source est un exutoire à la surface du sol par lequel les eaux souterraines se déplacent suivant la pente de la couche imperméable et apparaissent à l'air libre (Dupont, 1981). L'aménagement d'une source consiste en la réalisation d'un ouvrage de génie civil permettant de collecter et de rassembler différents filets d'eau, éventuellement à l'aide de drains, avec une aire de captage qui doit être soigneusement protégée (PS-Eau, 2012). Les sources vulnérables aux pollutions sont généralement utilisées comme eau de boisson par les populations.

#### **I.1.4.3.2. Puits**

Un puits est une fosse verticale creusée habituellement par piochage dans le sol jusqu'à une nappe phréatique peu profonde au moins 60 cm de diamètre et trois (3) mètres de profondeur. Cet ouvrage permet de recueillir de l'eau (Coulibaly *et al.*, 2004). Si cette nappe phréatique est un aquifère confiné, la réalisation du puits à ce niveau provoque une montée brutale de l'eau jusqu'à l'équilibre de la pression de l'eau avec celle de l'atmosphère ; il s'agit alors d'un puits artésien. Les puits traditionnels ont des parois qui, en général, ne sont pas revêtues ou possèdent juste un revêtement peu épais de ciment non armé. Quant aux puits modernes à grands diamètres, leurs parois sont tenues par des buses en béton armé (Yélognissè, 2007). Le puits est en particulier adapté aux localités enclavées. L'exhaure est assurée par puisage manuel (seau et corde). Les puits sont vulnérables aux pollutions et sont utilisés au même titre que les eaux de source (Vilaginès, 2003).

#### **I.1.4.3.2. Forages**

Un forage est également un trou vertical creusé mécaniquement dans le sol ; il met en évidence les nappes d'eau de grandes profondeurs, emprisonnées dans les couches de sol. Les forages atteignent les nappes hydrogéologiques et sont munis de pompes. Ils peuvent avoir des débits considérables de l'ordre de 3000 m<sup>3</sup>/jour. La différence entre le puits et le forage se situe donc au niveau du diamètre et de la profondeur du trou. Ce diamètre est relativement plus petit pour le forage (de l'ordre du centimètre) et plus grand pour le puits (de l'ordre du mètre). Les grandes profondeurs des forages permettent au maximum d'éviter les risques de pollution et de trouver des nappes ayant un débit relativement élevé (Vilaginès, 2003). Un

forage est équipé d'un système mécanique (pompe à motricité humaine) ou électromécanique d'exhaure dans les aquifères profonds (Molinie, 2009 ; PS-Eau, 2012).

## **I.2. POLLUTION DE L'EAU**

### **I.2.1. Définition**

La pollution de l'eau est définie comme toute modification physique, chimique, ou microbiologique de sa qualité qui influe négativement sur les organismes vivants ou rend l'eau inadéquate aux usages souhaités. Ainsi on dit qu'une eau est polluée lorsque sa composition ou son état est directement ou indirectement modifié par l'action de l'homme (Ezziane, 2007). Cet état résulte d'un évènement ou processus qui réduit l'utilité des eaux du globe, spécialement en ce qui concerne la santé de l'être humain et les effets sur l'environnement (Gaujous, 1993). Les eaux douces sont devenues le réceptacle de pollutions multiples, de natures chimique, organique, radioactive, microbiologique et d'origines variées, c'est-à-dire urbaine, industrielle ou agricole (Gaujous, 1993).

### **I.2.2. Pollution des eaux superficielles et souterraines**

Les eaux superficielles assurent le stockage de l'eau apportée par le bassin versant. Ils revêtent donc une importance spéciale pour la rétention de certains composants, en particulier les nutriments qui favorisent l'eutrophisation (Gaujous, 1993). C'est précisément un apport excessif en nitrates et orthophosphates qui entraînent le déséquilibre d'un écosystème dû à un excès de nutriments et de matières organiques biodégradables qui se traduit par une croissance énorme des algues. La décomposition de la matière organique met en œuvre des bactéries qui consomment de l'oxygène et génèrent des substances toxiques. La prolifération en surface de ces algues empêche la pénétration de la lumière et les eaux profondes se trouvent désoxygénées. Les espèces animales et les bactéries aérobies meurent. Seules survivent les bactéries anaérobies qui se multiplient en provoquant des fermentations et en libérant des gaz nauséabonds (Bettati, 2012). Le seul moyen efficace pour supprimer l'eutrophisation des lacs consiste à réduire la présence des éléments nutritifs ; il est possible de développer et d'implanter des races de poissons herbivores (Hertig, 2006).

L'origine de la pollution des eaux souterraines peut être naturelle ou anthropique (Laurent, 2013). En effet les principaux facteurs qui contrôlent la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines sont les activités anthropiques, le contexte hydrogéologique et le climat (Van der Werf, 1996 ; Mfonka *et al.*, 2015).

### I.2.3.1. Pollution anthropique

Les principales sources de pollution anthropique sont l'agriculture, qui s'applique de manière diffuse sur le territoire, les industries qui sont à l'origine de rejets diversifiés et souvent localisés, et les activités domestiques via les rejets des eaux usées ou les décharges (Kenfaoui, 2008 ; Laurent, 2013). La nature des polluants dépend de l'occupation du sol et des activités du milieu considéré (Zgheib, 2009). Les facteurs tels que les activités autour des points d'eaux, le défaut d'aménagement de ces derniers, la proximité des sources de pollution telles les déchets urbains, les décharges sauvages d'ordures, les ouvrages d'assainissement individuel (latrines, puisards, fosses septiques), et le non-respect des règles d'hygiène élémentaires par les utilisateurs, sont à l'origine de la pollution microbienne et/ou chimique des eaux en milieux urbains (Dovonou, 2012 ; Belghiti *et al.*, 2013 ; Zerhouni *et al.*, 2015). Outre l'action humaine, les propriétés physiques du milieu et le contexte climatique comptent au rang des facteurs déterminants de la pollution des eaux (Tab.I).

**Tableau I:** Synthèse des activités anthropiques sur les ressources en eau et solutions probables (Adjagodo *et al.*, 2016)

<b>Activités</b>	<b>Types de polluants</b>	<b>Eléments polluants</b>	<b>Solutions</b>
<b>Domestiques</b>	Déchets solides et liquides	Ordures ménagères, eaux usées, excréta	Assainissement correct, décharges contrôlées, installations septiques modernes, formation en hygiène
<b>Agricoles</b>	Engrais chimiques, organiques et pesticides intensifs	Insecticides et pesticides organochlorés, herbicides, composts à déjections animales et humaines maltraités fumures, lisiers etc.	Campagnes d'information au travers des médias ; Respect des périmètres interdits ; surveillance
<b>Pêche</b>	Engrais et pesticides	Pesticides Organochlorés	Interdiction de l'utilisation de produits prohibés de capture
<b>Industrielles</b>	Effluents industriels et divers produits toxiques, gisements de mines	Matières organiques naturelles, produits industriels de synthèse, métaux lourds, solvant, graisse, et colorants	Obligation de faire l'étude d'impact environnemental avant installation des industries ; Surveillance et contrôle de la qualité des eaux usées industrielles avant le
<b>Hospitalières</b>	Déchets liquides et solides hospitaliers	Produits toxiques liés à la radiologie, aux laboratoires d'analyses, déchets liés aux dentistes, les médicaments inutilisés, les thermomètres cassés etc	Politiques de gestion des déchets et de recyclage des déchets professionnels hospitaliers, installation d'un incinérateur dans les centres hospitaliers, surveillance et contrôle de la qualité des eaux usées hospitalières avant leurs rejets

<b>Autres :</b> Teinturerie, blanchisserie, imprimerie, peinture, mécanique, studios, laboratoires techniques de tirage, tourisme, trafic des produits pétroliers, exploitations de sable et des mines, etc	Déchets solides et liquides, carburants nomades sur les eaux etc.	Solvants, biocides, résines, peinture, shampoing, lotions, colorants, eau de javel, huiles usées, résidus solides, décapant, huile de vidange, filtre à huile, piles usagées, mazout, essences, animaux, etc.	Politiques de gestion des déchets et de recyclage des déchets solides et liquides ; interdictions du transport des produits pétroliers en pirogues.
---	--	--	--

### I.2.3.2. Pollution organique

La pollution organique peut être liée à l'infiltration dans le sol des eaux usées et des engrais chimiques (Lagnika *et al.*, 2014a). Le lixiviat des décharges publiques constitue le principal vecteur de la pollution métallique issue des sites de stockage des déchets vers la nappe phréatique (Jourdan *et al.*, 2005 ; Er-Raioui *et al.*, 2011). Le risque de pollution chimique et biologique dépend d'une part des caractéristiques des eaux d'infiltration et, d'autre part, des propriétés naturelles des couches géologiques qui séparent la nappe phréatique de la surface du sol (Nola *et al.*, 2006). Le risque de contamination de la nappe phréatique est plus important avec la perméabilité du sol (ex : sablonneux) qui la recouvre, et sa faible profondeur par rapport à la surface (Degbey *et al.*, 2010 ; El Ouedghiri *et al.*, 2014). Par ailleurs, plusieurs autres facteurs peuvent être responsables de la contamination de l'eau du réseau public, notamment le défaut d'étanchéité des tuyaux de distribution (Ndiaye *et al.*, 2010), les incidents (réparations, branchements, fuites...) survenant sur le réseau (Gauthier, 2002 ; Hartemann, 2013), et la présence de biofilms dans le réseau de distribution d'eau (Gauthier, 2002 ; Poisson, 2011). Pour la contamination des eaux souterraines, le risque est essentiellement lié au régime pluviométrique, à l'épaisseur de la zone non saturée, aux interactions nappes-rivières, et à la vitesse des écoulements à travers le sol et le sous-sol. Généralement, le couple rétention-dégradation détermine la mobilité des substances nocives (Hartemann, 2013). Avec la pluie, les eaux sont entraînées en partie par le ruissellement et une partie s'infiltrer contribuant à la recharge de la nappe ; cependant la pollution de cette dernière est consécutive à l'entraînement des matières organiques et minérales de la surface.

### **I.2.3.3. Pollution par les eaux usées domestiques**

Ces eaux proviennent des habitations et sont en général véhiculées par un réseau d'assainissement. Elles rassemblent les eaux ménagères (eaux de toilette, de lessive, de cuisine...) et les eaux vannes (urines et matières fécales). Ces eaux ont une forte teneur en matières minérales, matières organiques et divers germes fécaux (Daffri, 2008). Elles sont collectées et acheminées en zone urbaine pour les traiter avant leur rejet final. Elles constituent un effluent brut dont la composition varie suivant la taille de la communauté urbaine d'origine, les habitudes alimentaires ainsi que l'hygiène des individus et le lieu géographique étudié (Meot, 1990).

### **I.2.3.4. Pollution par les eaux usées industrielles**

Les eaux industrielles sont les rejets des procédés industriels qui utilisent de l'eau dans la composition, la fabrication et le nettoyage des produits. Elles sont caractérisées par leur grande diversité suivant l'utilisation de l'eau en l'industrie. Elles peuvent contenir des matières organiques (industries agroalimentaires et abattoirs), des hydrocarbures (raffineries), des produits chimiques parfois toxiques (industries chimiques, pharmaceutiques et tanneries), et des matières radioactives des centrales nucléaires, des centres de recherche et des hôpitaux (Genin, 2003).

### **I.2.3.5. Pollution par les eaux usées pluviales**

Les eaux usées pluviales proviennent de l'écoulement de la pluie sur les routes et d'autres surfaces pavées. Les eaux de pluies ne sont pas exemptes de pollutions ; au contact de l'air, elles se chargent d'impuretés (fumées industrielles, résidus de pesticides...) puis, en ruisselant, des résidus déposés sur les toits et les chaussées des villes (huiles de vidange, carburants, résidus de pneus, métaux lourds...). Les eaux pluviales peuvent être collectées en même temps que les eaux usées domestiques ou bien séparément (réseau unitaire ou séparatif).

### **I.2.3.6. Contaminants des eaux de boisson**

Une eau de boisson ne doit pas contenir des germes des maladies à transport hydrique, des substances toxiques, ni des quantités excessives de matières minérales et organiques. Elle doit par contre être limpide, incolore et ne posséder aucun goût ou odeur désagréable. En outre, l'eau potable doit contenir sans excès un certain nombre d'éléments minéraux dont la présence lui confère une saveur agréable, à l'exclusion (1) de ceux qui seraient l'indice d'une contamination et (2) de toute substance toxique (DEPES, 2019). L'eau potable doit convenir à la consommation humaine et pour tous les usages domestiques habituels (OMS, 1997). Elle

doit répondre aux normes de potabilité proposées au niveau mondial et reprises localement par des organismes nationaux. La qualité d'une eau est définie par les diverses substances qu'elle contient, leur quantité et l'effet qu'elles ont sur l'écosystème et sur l'être humain (Festy *et al.*, 2003).

#### **I.2.3.6.1. Contaminants microbiologiques indicateurs de pollution et effets sanitaires**

Les principales catégories de pathogènes d'origine hydrique sont les bactéries, les virus et les protozoaires. L'évaluation pratique de la qualité microbiologique des eaux est faite sur la base d'organismes dits indicateurs (Servais *et al.*, 2009); ce choix résulte des difficultés ou de l'impossibilité technique de détecter toute la diversité des microorganismes (Givord & Dorioz, 2010).

Les meilleures bactéries indicatrices de contamination fécale sont les Coliformes comme *Escherichia coli* et les Entérocoques fécaux ou intestinaux (Rodier *et al.*, 2009). En plus de ces bactéries, d'autres auteurs (Garcia-Armisen, 2006 ; Rodier *et al.*, 2009) ont mentionné l'utilisation des Coliformes totaux, des Coliformes thermotolérants des bactéries anaérobies sulfitoréducteurs, notamment *Clostridium perfringens* et les bactéries aérobies revivifiables comme les indicateurs de pollution et d'efficacité de traitement.

Les microorganismes pathogènes les plus fréquemment rencontrés dans les eaux sont consignés dans le tableau II avec les pathologies dont ils sont responsables. Les microorganismes pathogènes présents dans l'eau sont le plus souvent transmis par voie féco-orale (Servais *et al.*, 2009 ; Hartemann, 2013); la contamination de l'homme se réalise alors par consommation soit d'une eau de boisson ou d'aliments souillés, soit lors d'un bain ou d'un contact avec des eaux à usage récréatif (Servais *et al.*, 2009 ; Aubry & Gaüzère, 2012).

En fonction des voies de transmission, on distingue les maladies hydriques (liées à l'eau de boisson) telles que la fièvre typhoïde, l'hépatite, le choléra, l'amibiase, la giardiase ..., de celles liées aux pénuries d'eau en terme et au défaut d'hygiène (gale, mycoses, poux...), celles liées aux vers (helminthiases), et celles dues aux vecteurs tels les insectes (Paludisme) (Rosillon, 2003).

**Tableau II** : Principaux groupes et genres d'agents pathogènes responsables de maladies d'origine hydrique (Servais *et al.*, 2009)

Groupes de microorganismes	Pathogènes	Pathologies
<b>"Virus"</b>	Entérovirus (polio, écho, coxsackie)	Méningite, paralysie, fièvres, myocardie, problèmes respiratoires et diarrhée
	Hépatite A et E	Infections hépatiques
	<i>Norovirus</i>	Diarrhée/ gastro-entérite
	<i>Sapporovirus</i>	Diarrhée/ gastro-entérite
	<i>Rotavirus</i>	Diarrhée/ gastro-entérite
	<i>Astro virus</i>	Diarrhée
	<i>Vibrio cholerae</i>	Choléra
	<i>Adenovirus</i>	Diarrhée, infections oculaires et problèmes respiratoires
	<i>Reovirus</i>	Problèmes respiratoires et entériques
	<i>Poliovirus</i>	Poliomyélite
	Coxsackie A	Méningite
<b>Bactéries</b>	<i>Salmonella</i>	Fièvre typhoïde et diarrhée
	<i>Shigelia</i>	Diarrhée
	Campylobacter	Diarrhée (cause première des intoxications alimentaires)
	<i>Yersinia enterocolitica</i>	Diarrhée
	<i>Escherichia coli</i> O157: H7 et d'autres souches	Diarrhée risque de complications (urémie hémolytique) chez les enfants en bas âges
	<i>Legionella pneumophila</i>	Pneumonie et autres infections respiratoires
	<i>Yersinia Enterocolitica</i>	Diarrhée, septicémie
<b>Protozoaires</b>	<i>Naegleria fowleri</i>	Méningo-encéphalite
	<i>Entamoeba histolytica</i>	Dysenterie amibienne
	<i>Giardia lamblia</i>	Diarrhée chronique
	<i>Cryptosporidium parvum</i>	Diarrhée sévère, mortelle chez les individus immunodéprimés
	<i>Cyclospora cayetanensis</i>	Diarrhée
	Microsporidies incluant : <i>Entercytozoan</i> spp. <i>Encephalitozoan</i> spp., <i>Septata</i> spp., <i>Pleistophora</i> spp. <i>Nosema</i> spp.	Diarrhées chroniques, affaiblissement, problèmes pulmonaires, oculaires, musculaires et rénaux
	<i>Balantidium coli</i>	Dysenterie, colite chronique
<b>Amibes</b>	<i>Naegleria</i> ,	Amibiase : diarrhée légère à la dysenterie
	<i>Hartmannella</i>	
	<i>Acanthamoeba</i> ssp.	
<b>Cyanobactéries</b>	<i>Microcystis</i> sp.	Diarrhée par ingestion des toxines produites par ces organismes (la toxine microcystine est impliquée dans des lésions hépatiques)
	<i>Anabaena</i> sp.	Pathologies neurologiques liées à l'ingestion de neurotoxines
	<i>Aphanizomenon</i> sp.	Pathologies neurologiques liées à l'ingestion de neurotoxines

<b>Helminthes</b>	<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariotose
	<i>Schistosoma</i>	Schistosomiase
	<i>Heterophyes Heterophyes</i>	Hétérophyose : anorexie, nausée, douleurs abdominales, diarrhée et perte de poids
	<i>Cestoda</i> ou ténias	
	<i>Dracunculus medinensis</i> ou vers de Guinée	Vomissement, diarrhée ou nausée, démangeaisons et fièvre
	<i>Trichuris trichiura</i>	Douleurs abdominales, diarrhée, anémie et dénutrition

#### I.2.3.6.2. Contaminants physicochimiques des eaux et effets sanitaires

Ils regroupent les paramètres physicochimiques liés à la structure naturelle de l'eau, les éléments indésirables et ceux qui sont toxiques (Vaute, 1999). Les paramètres physicochimiques liés à la structure naturelle de l'eau incluent la température, le pH, la conductivité, les ions majeurs : les bicarbonates, les chlorures, les sulfates, le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, etc. (Burnol *et al.*, 2006). Les éléments indésirables prennent en compte les composés azotés (ammonium, nitrites, nitrates), phosphatés (phosphates) ; les composés organiques (hydrocarbures totaux, l'indice phénol), les métaux et autres éléments (argent, bore, barium, cuivre, fluor, fer, manganèse et zinc). Les éléments toxiques comprennent l'arsenic, le cadmium, le chrome, le nickel, le plomb et le mercure ; ils constituent les éléments traces métalliques et sont généralement définis comme des métaux lourds. Trois de ces métaux (cadmium, plomb, mercure) ont été identifiés comme des substances dangereuses prioritaires, et sont soumis à un objectif de rejet "zéro" dans les eaux souterraines par la Décision 2455/2001/CE du Conseil Européen modifiant la Directive Européenne sur l'Eau 2000/60/CE (Burnol *et al.*, 2006). A l'opposé du risque microbiologique encouru à court terme, le risque chimique est à moyen et long termes (Payment & Hartemann, 1998). L'origine et l'effet sanitaire de quelques éléments chimiques indésirables sont décrits ci-dessous (Tab.III).

**Tableau III** : Effets sanitaires liés à quelques paramètres chimiques indésirables (source : Hounsounou *et al.*, 2016)

Paramètres	Effets sanitaires	Sources
Nitrates et Nitrites	Méthémoglobinémie résultant de la réduction des nitrates en nitrites par les microorganismes empêchant l'hémoglobine de transporter de l'oxygène (Association Santé Environnement France, 2010) ; effet cancérigène résultant des nitrosamines (composés formés à partir de la combinaison des nitrites avec certaines amines ou amides (Botta & Bellon, 2004).	Activités humaines (OMS, 2011) ; installations septiques déficientes (Levallois & Phaneuf, 1994) ; engrais, eaux usées, décharges, eaux de ruissellement, lessivage des terres par les précipitations et l'oxydation de l'azote, oxydation des nitrites par les bactéries suite à l'infiltration des eaux usées ; matières fécales des animaux à sang chaud, fosses d'aisance à fond perdu (Mfonka <i>et al.</i> , 2015) .
Phosphates	L'ostéoporose ou des problèmes aux reins (Degbey <i>et al.</i> , 2010).	Activités agricoles et rejets urbains (Hartemann, 2013) ; Plomb Métallurgie (monnaie, canalisations et ustensiles de cuisine), fabrication des peintures et d'hydrocarbures ; formation des aérosols plombiers issus de la fusion de minerais, utilisation de combustibles fossiles (Ahonon, 2011) ;
Fluor	Fluorose caractérisée par la coloration blanchâtre, jaune ou brune des dents.	Se trouve naturellement dans certains aliments tels que le thé, les poissons de mer, les dattes, les choux, les carottes, les oignons, les asperges, les épinards et l'eau.
Plomb	Saturnisme se traduisant par des troubles cliniques, des anomalies biologiques et des altérations histopathologiques variées (Degbey <i>et al.</i> , 2010); atteintes cognitives et neurocomportementales (Laurent <i>et al.</i> , 2013) ; augmentation de la sensibilité aux effets toxiques du plomb chez les jeunes enfants liée à la perméabilité de la barrière hématoencéphalique ; l'anorexie, vomissements, irritabilité, troubles de comportement ; chez la femme enceinte,	Corrosion des composantes structurales des réseaux de distribution et des tuyauteries domestiques en présence d'oxydants (oxygène dissous et Chlore) (Viraraghavan <i>et al.</i> , 1999).

	nuisance au développement du système nerveux central du fœtus ; chez l'adulte, douleurs abdominales (colique) et constipation ; intoxication sévère : convulsions, coma, mort (INSPQ, 2003).	
Mercure	L'intoxication par les sels de mercure (hydrargyrisme), caractérisée par des lésions des centres nerveux se traduisant par des tremblements. Insuffisance rénale irréversible due aux effets à long terme des dérivés minéraux du mercure sur les reins et effet des dérivés organiques (organomercuriels) sur le système nerveux central (Botta & Bellon, 2004). Sources : activité volcanique, dégazage des sols.	Anthropogéniques : industries de production de l'électricité par combustion (charbon, mazout, etc.), de fusion des métaux et d'incinération de matières résiduelles ; objets d'usage courant : tubes fluorescents, interrupteurs à bascule, produits des technologies de l'information et des télécommunications, les thermomètres domestiques et les thermostats ainsi que l'amalgame dentaire (Gendron <i>et al.</i> , 2007).
Cadmium	Troubles rénaux, d'altérations osseuses et d'hypertension artérielle ; « Itai Itai » caractérisé par une décalcification osseuse, une protéinurie et une glucosurie (Rodier <i>et al.</i> , 2009).	Érosion naturelle, lessivage des sols décharges industrielles (Botta & Bellon, 2004); solubilisation par les acides des substances alimentaires à partir de poteries vernissées, de boîtes de conserve et d'ustensiles de cuisine galvanisés (Rodier <i>et al.</i> , 2009).
Arsenic	Intoxication aiguë : troubles gastro-intestinaux plus ou moins accentués, troubles hépatiques et rénaux et manifestations cardiovasculaires ; hypertension et tachycardie ; intoxication chronique : troubles digestifs, syndromes mélano-dermiques et neurologiques (Rodier <i>et al.</i> , 2009).	Rejets d'eaux résiduaires industrielles, traitement de minerais arsenicaux (cuivre...), combustion du charbon ou de déchets, dépôts de résidus industriels, utilisation d'engrais phosphatés, d'herbicides, d'insecticides et de détergents (les eaux de blanchisserie) érosion naturelle, lessivage des particules telluriques, éruptions volcaniques, zones de fractures sous-marines (Rodier <i>et al.</i> , 2009),
Argent	Troubles digestifs, un liseré gingival et une coloration gris bleuâtre de la peau. Cette dyschromie prédomine sur le	Minerais (un sous-produit de l'extraction du cuivre, du plomb et du zinc) ; bijouterie, miroiterie,

	visage et les partie découvertes, ainsi que sur les ongles (Rodier <i>et al.</i> , 2009).	photographie, métallurgie, contacts électriques, amalgames dentaires et médecine (collyres, collutoires) (Rodier <i>et al.</i> , 2009).
Chrome	Nécrose du foi, intoxication aiguë : tubulonéphrite parfois compliquée d'une hépatite toxique avec ictère ; intoxication chronique : lésions cutanées et des muqueuses avec des atteintes de l'appareil respiratoire (bronchites, asthme, cancers broncho-pulmonaires) (Rodier <i>et al.</i> , 2009).	Teintures, colorants et rejets des ateliers de galvanoplastie (Rodier <i>et al.</i> , 2009).
Cadmium	Intoxication par l'arsenic ; graves troubles intestinaux Intoxications (Rodier <i>et al.</i> , 2009).	Extraction minière, érosion, corrosion, industries (électriques, métallurgiques, chimiques, pétrolières, transformation du bois), lessivage des sols agricoles
Cyanures		
Nickel, Zinc		
Etain- Cuivre		
Aluminium	Maladie d'Alzheimer et syndromes parkinsoniens (Botta & Bellon, 2004).	Métallurgie, constructions automobile et aéronautique, fabrication d'appareils ménagers (Botta & Bellon, 2004).
Pesticides	Maladie d'Alzheimer et syndromes parkinsoniens (Botta & Bellon, 2004).	Sources : fongicides, herbicides, corvicides, molluscicides, rodenticides et acaricides par les eaux de pluie et de ruissellement vers les cours d'eau et nappe phréatique (Botta & Bellon, 2004).

### **I.2.3.7. Conséquences de la pollution des eaux et impact sur la santé humaine**

L'insalubrité de l'eau de boisson, le manque d'installations d'assainissement et la carence en hygiène sont les causes principales de maladies entériques comme la diarrhée, l'hépatite, le choléra, les infections intestinales. La prévalence des maladies à vecteurs comme la malaria et l'encéphalite est aussi associée à l'eau. Les polluants de l'eau ont d'autres effets spécifiques sur les organismes vivants. Qu'ils soient liés à un endommagement de l'ADN (génétoxicité), au développement du cancer comme avec le DDT et les PCB, à la neurotoxicité ou aux perturbations endocriniennes qui empêchent la reproduction, la plupart des effets des contaminants de l'eau sont majeurs et chroniques (Gautier & Fellous, 2008). Les maladies à transmission hydrique sont nombreuses et peuvent être graves à mortelles (Bonnefoy *et al.*, 2002). Les substances toxiques ont des conséquences sur l'équilibre écologique du milieu. Dans certains écosystèmes, les produits chimiques peuvent être à l'origine de la disparition de certaines espèces animales et/ou végétales et, par conséquent, entraîner le dysfonctionnement de la chaîne trophique (Gold, 2002).

Le danger de la contamination s'amplifie au fur et à mesure que l'on monte à travers les maillons des chaînes trophiques. La pollution des eaux impacte également la santé humaine mais elle n'est pas toujours immédiate. Les eaux souillées consommées par les populations contiennent des microorganismes banals et pathogènes sources de plusieurs maladies hydriques (choléra, dysenterie, diarrhée, fièvre typhoïde). Les nitrates issus des engrais chimiques se transforment en nitrites une fois lessivée. Ces nitrites, arrivés au niveau de l'estomac, peuvent réagir avec les amines secondaires apportées par les aliments pour former les nitrosamines qui ont un effet cancérigène (Pavard, 2013). Les matières en suspension et surtout l'azote et le phosphore favorisent l'eutrophisation, avec le développement des maladies associées à la présence des mauvaises herbes aquatiques dans les pays tropicaux en développement à l'origine des problèmes de santé publique : la malaria, la schistosomiase et la filariose lymphatique. Les métaux qui sont transférés du milieu aquatique aux poissons, aux hommes et autres animaux piscivores, ont des impacts probables sur l'environnement et la santé humaine (Chen *et al.*, 2000). Les hydrocarbures et les pesticides les plus persistants et possédant des propriétés de bioaccumulation sont souvent retrouvés dans les organismes et le sang humain (Fanou *et al.*, 2006). Des études effectuées au Kenya (Kinyamu *et al.*, 1998) et au Ghana (Ntow, 2001) ont révélé la présence de résidus de composés organochlorés dans le lait maternel. Les pesticides dans l'organisme humain peuvent provoquer une augmentation du nombre de cancers des testicules et du sein ainsi

qu'une baisse de la fertilité, notamment une diminution de la production spermatique (Sharpe & Skakkebaek, 1993).

### **I.3. METHODES DE TRAITEMENT DE L'EAU DE CONSOMMATION**

Les dispositions prises par une population pour rendre une eau potable avant son utilisation sont variables et les techniques de traitement sont nombreuses. Pour cela, la plupart des ménages utilisent l'eau de Javel ou dioxyde de chlorure. D'autres méthodes telles que l'ébullition, la décantation et le filtrage sont utilisées. Parmi les autres méthodes de traitement de l'eau de boisson, le filtrage (par mouchoir propre) et la décantation de l'eau sont les plus souvent employés (CASEES, 2009). Le choix d'une méthode de traitement dépend du rang social de chaque ménage. Ces méthodes sont applicables à domicile et permettent de rendre l'eau potable à l'échelle familiale.

#### **I.3.1. Filtration**

On peut facilement filtrer l'eau avec un tissu ; cela permet d'éliminer ses principales impuretés solides ainsi que les larves d'insectes susceptibles de s'y trouver. Le tissu dont on se sert, de préférence du coton, doit être suffisamment épais pour retenir les impuretés. S'il est trop épais, la filtration durera plus longtemps. Il doit être lavé avant chaque utilisation. La filtration n'étant pas un moyen de traitement satisfaisant en soi, filtrer l'eau avant de la traiter par l'une des autres méthodes citées ci-dessous permet d'améliorer significativement la qualité de l'eau obtenue.

#### **I.3.2. Ébullition**

Le traitement par ébullition permet de tuer la totalité des germes et micro-organismes présents dans l'eau (OMS, 1997). Pour cela, l'eau doit être préalablement filtrée ou décantée puis bouillie à gros bouillons (il ne suffit pas de la faire frémir) pendant une minute à basse altitude, et pendant trois minutes à plus de 2000 mètres d'altitude. Une eau traitée par ébullition peut avoir un goût fade ; ce problème peut être réglé en secouant vigoureusement l'eau pour la réoxygéner ou en y ajoutant un peu de sel (PS-eau, 2012).

#### **I.3.3. Chloration**

La chloration est un moyen simple et efficace pour désinfecter l'eau en vue de la rendre potable. Elle consiste à introduire des produits chlorés (pastilles de chlore, eau de javel) dans de l'eau pour tuer les micro-organismes qu'elle contient. Après un temps d'action de 30 minutes, l'eau est potable. Elle le reste pendant quelques jours (en fonction des conditions de

stockage) grâce à l'effet rémanent du chlore. Cette méthode présente néanmoins des inconvénients tels que :

- la résistance au traitement de certaines bactéries, virus et protozoaires ;
- la formation des sous-produits de désinfection organochlorés tels que les trihalométhanes qui sont cancérigènes (Miquel, 2003).

#### **I.3.4. Solar désinfection (SODIS)**

Le SODIS est une méthode de désinfection de petites quantités d'eau à domicile par le rayonnement solaire. Son application implique l'exposition au soleil, pendant 6 h minimum, une eau claire contenue dans des bouteilles en plastique transparent (PET). L'élimination des bactéries et autres (les levures, les moisissures et les protozoaires) se fait par une action synergique entre les rayons UV-A et la température lorsque la température de l'eau dépasse 45°C. Cette méthode peut être utilisée pour traiter à court terme les eaux de surface ou de puits contaminées par des bactéries pathogènes (Spuhler, 2009). Malgré sa simplicité, cette méthode présente des limites telles que l'incapacité d'éliminer les contaminants chimiques de l'eau, la nécessité d'un fort rayonnement solaire, le traitement de petites quantités d'eau (1-3L).

#### **I.4. BIODIVERSITE DU MILIEU SOUTERRAIN**

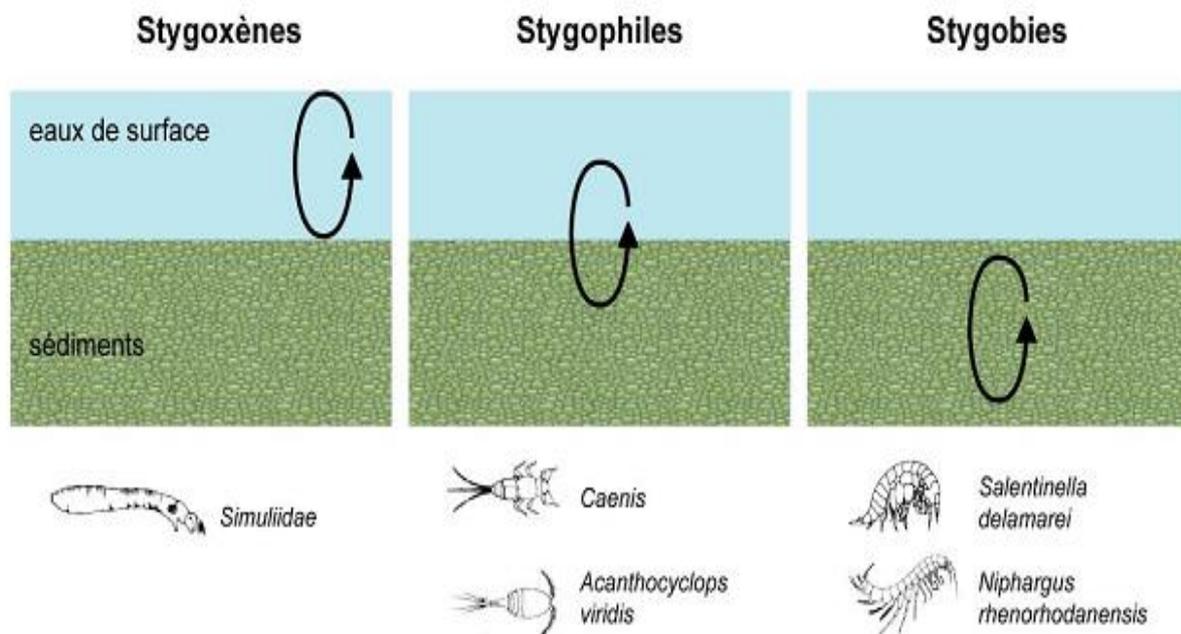
La faune souterraine, aussi appelée stygofaune, regroupe les vers, les crustacés, les mollusques et les insectes qui habitent le fond des lacs et des cours d'eau. Le milieu souterrain n'est pas seulement un vaste réservoir d'eau, c'est également un environnement abritant de nombreux groupes taxonomiques. Sa biodiversité est inégalée, relique, originale et adaptée, comparée à celle des écosystèmes superficiels qui est capable de coloniser une gamme variée d'habitats à l'échelle continentale (Piscart *et al.*, 2008, 2011 ; Dole-Olivier *et al.*, 2009a ; Griebler & Avramov, 2015). Ainsi, le milieu souterrain a été longtemps considéré comme n'étant colonisé que par quelques espèces très spécialisées; cependant, les données actuelles montrent plutôt qu'il s'agit d'un environnement où vivent des communautés d'espèces relativement riches, composées majoritairement d'invertébrés mais aussi de vertébrés et de micro-organismes (Juberthie & Decu, 1994 ; Gibert & Deharveng, 200; Culver & White, 2005). Cette faune, à elle seule, représente une part significative de la biodiversité mondiale et comprend tous les grands groupes zoologiques, certaines lignées étant anciennes de plusieurs dizaines de millions d'années (Boutin *et al.*, 2011).

La liste faunistique des eaux souterraines du globe indique que celles-ci sont colonisées par près de 7000 espèces et sous-espèces, dont la majorité peut être considérée

comme stygobie (Botoseanu, 1986 ; Stoch, 1995). La faune hypogée aquatique est généralement composée de crustacés, qui représentent à eux seuls 44% des espèces souterraines aquatiques connues (alors qu'ils ne représentent que 4% des espèces aquatiques épigées européennes (Danielopol *et al.*, 2000).

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 tels que Williams & Hynes (1974) et Marmonier *et al.*, (1993), comme le montre la Fig. 1 :

- les organismes stygoxènes correspondent aux espèces typiquement épigées, qui n'ont aucune affinité avec le domaine aquatique souterrain mais qui peuvent y être rencontrés accidentellement ;
- les stygophiles regroupent les espèces épigées qui ont une certaine affinité avec le domaine aquatique souterrain, où elles peuvent exploiter des ressources et réaliser partiellement ou totalement leur cycle vital ;
- les stygobies sont des espèces morphologiquement, physiologiquement et/ou éthologiquement adaptées aux eaux souterraines, qui réalisent la totalité de leur cycle biologique dans ce milieu.



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

#### **I.4.1. Adaptations au milieu souterrain**

Les animaux qui peuplent les milieux souterrains ont progressivement évolué vers la forme souterraine que nous pouvons observer de nos jours. Cette évolution, due aux paramètres abiotiques et biotiques sélectifs du milieu, implique de nombreux changements adaptatifs tant au point de vue morphologique que métabolique (Notenboom, 1991).. Ainsi, l'absence de lumière, les périodes d'hypoxie et les ressources trophiques limitées représentent des contraintes environnementales auxquelles la faune souterraine a dû s'adapter. Contrairement à leurs homologues superficiels, les animaux souterrains ne présentent aucune périodicité au cours de leur vie. En effet, n'étant pas soumis à l'alternance jour/nuit, ils n'ont pas de variation journalière de l'activité ou du métabolisme (Hervant *et al.*, 2002). De même, la reproduction, en général cyclique chez beaucoup d'épigés, est relativement constante chez les hypogés lorsque les conditions environnementales sont favorables (Ginet & Decou, 1977). Le régime alimentaire des animaux souterrains est directement influencé par la rareté de la nourriture et lié à des apports extérieurs. Les organismes hypogés sont donc principalement détritivores (avec une faible proportion de carnassiers) et optimisent ainsi la prise alimentaire. Ils 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. L'urodèle *Proteus anguinus* ou les poissons cavernicoles amblyopes peuvent atteindre des longévités records de 90 et 150 ans respectivement (Poulson, 1963).

La rareté de la nourriture est le paramètre considéré comme étant à l'origine de l'une des adaptations les plus rencontrées chez les animaux souterrains, à savoir un métabolisme réduit par rapport à celui des espèces épigées voisines (Hervant *et al.*, 1997 ; Hervant & Renault, 2002).

#### **I.4.2. Rôle de la faune aquatique souterraine**

Le suivi de la santé du benthos permet d'évaluer les répercussions de la pollution et de la dégradation des habitats riverains sur les écosystèmes aquatiques. Des changements au sein d'une communauté du genre diminution du nombre d'espèces ou disparition de certaines au profit d'autres espèces plus tolérantes à la pollution, indiquent une détérioration de l'état de santé de l'écosystème (Lévêque & Balian, 2005). Les organismes vivants sont capables d'intégrer à long terme les effets simultanés de plusieurs facteurs de l'environnement et peuvent donc être beaucoup plus informatifs sur la qualité du milieu que les analyses physico-chimiques ponctuelles reflétant les instantanés d'une situation.

Des espèces particulières ou des ensembles d'organismes dans les eaux souterraines ont pu ainsi être utilisés comme bioindicateurs de l'origine des eaux souterraines et du régime hydrologique ou de la stabilité physique des nappes, ou encore des conditions du milieu local (matière organique, oxygène, pollutions...) (Malard *et al.*, 1996).

La faune souterraine aquatique joue également un rôle dont l'importance est encore mal connue dans l'autoépuration des aquifères par modification des sédiments (1), des processus de transformation biochimiques des polluants (2) ou leur bioaccumulation pendant de longues périodes (3), beaucoup d'animaux souterrains ayant une grande longévité. Il est donc important de mieux connaître et de protéger la biodiversité souterraine et de prendre en considération l'apport de l'écologie souterraine dans l'étude de l'état de l'environnement en général et, en particulier, dans celle des systèmes aquifères (Satour & Touazit, 2018).

La surveillance de la qualité de l'eau basée exclusivement sur la mesure de la concentration de ses polluants ne permet pas de tirer des conclusions sur la santé d'un écosystème. Elle ne renseigne pas sur la qualité de l'habitat, n'évalue ni l'effet des polluants non mesurés mais présents à des seuils inférieurs aux limites de détection des méthodes analytiques, ni les effets synergiques, additifs et antagonistes des différents polluants sur les organismes vivants. La surveillance biologique s'avère donc l'outil principal pour évaluer la santé des milieux aquatiques (Ramzi *et al.*, 2020).

#### **I.4.3. Aperçu sur la faune souterraine aquatique**

Les recherches écologiques sur la faune aquatique souterraine en général, et plus particulièrement sur celle des nappes phréatiques accessibles au niveau des puits, représentent un des aspects essentiels de la phréatobiologie appliquée, qui a connu depuis la fin du 20<sup>ème</sup> siècle un développement important au Maroc. Nous citerons ici les travaux de Boutin (1984 et 1987), Boulanouar (1986 et 1995), Boutin & Boulanouar (1984), Boutin & Dias (1987), Yacoubi-Khebiza (1990 et 1996), Lyakhloufi *et al.*, 1999, Lyakhloufi (2001), El Adnani *et al.*(2007) dans la région de Marrakech, ceux de Boulal (1988 et 2002) et Boulal *et al.*(1997) dans la région du Souss, ceux de Boutin & Idbennacer (1989), Idbennaer (1990) dans la province de Guelmim, et ceux de Fakher El Abiari (1999), Aït Boughrouss *et al.* (2007) et El Moustaine *et al.*(2013) dans une grande partie du Maroc.

Des travaux comparables sont encore peu nombreuses dans les autres pays du Maghreb et d'Afrique sub-saharienne, même si l'on dispose de quelques références récentes portant sur la faune et la qualité de l'eau des puits d'Algérie (Merzoug *et al.*, 2010; Khaldoun *et al.*, 2013), ou de celles des puits et sources de quelques régions du Cameroun (Zébazé Togouet *et al.*, 2009 et 2011; Tuekam Kayo, 2013; Nana Nkeugmeni, 2017; Pountougnigni *et*

*al.*, 2021) et du Bénin (Lagnika *et al.*, 2014; Lagnika, 2015). Sur les autres continents au contraire, et notamment en Europe, des recherches stygo-écologiques ont été entreprises depuis longtemps aussi bien sur les aquifères poreux et para-fluviaux (Dalmas, 1972; Sinton, 1984; Marmonier & Dole, 1986; Afonso, 1987, 1991 et 1992; Dumas *et al.*, 2001; Mauclaire & Gibert, 2001; Hahn, 2002 et 2006; Hahn & Fuchs, 2009; Malard *et al.*, 1999 et 2003; Hunt & Stanley, 2003; Datry *et al.*, 2005; Paran *et al.*, 2005), que sur des eaux karstiques (Turquin, 1980; Rouch & Ginet, 1983; Barthélémy, 1984; Gibert, 1986; Malard *et al.*, 1994 et 2002; Pipan, 2005; Pipan *et al.*, 2006) ou sur les deux types de milieux (Hahn & Fuch, 2009; Dole-Olivier *et al.*, 2009). De plus, certaines études procurent des informations sur la pollution ou d'autres influences anthropiques locales (Caumartin, 1981; Sinton, 1984; Malard *et al.*, 2002) alors que d'autres portent sur l'action de certains facteurs environnementaux naturels sur la répartition des stygobiontes à l'échelle régionale (Dole-Olivier *et al.*, 2009).

## **I.5. EVALUATION DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES**

La surveillance biologique et la surveillance physicochimique des eaux sont considérées comme des outils complémentaires. En général, la première mesure les effets des perturbations sur les communautés biologiques en place, alors que la seconde s'intéresse aux agents stressants ou, en d'autres mots, à la contamination environnementale.

### **I.5.1. Caractérisation physicochimique**

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

#### **I.5.1.1. Variables physiques**

Les variables physiques les plus pertinentes dans l'évaluation de la qualité des eaux sont : la température, les matières en suspension (MES), la couleur, la turbidité et les solides totaux dissous (TDS) (Rodier *et al.*, 2009).

La température de l'eau (en °C) 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 (en mg/L<sup>-1</sup>) comprennent les particules organiques et minérales non solubles transportées dans la colonne d'eau. Ces particules sont arrachées par l'érosion due aux eaux pluviales. Leur abondance dans une eau favorise la réduction de la

luminosité et abaisse la production biologique, ce qui entraîne une chute d'oxygène dissous et freine l'activité photosynthétique (Cairns *et al.*, 1972), c'est-à-dire l'autoépuration.

La mesure de la turbidité (en FTU) permet de préciser les informations visuelles sur l'eau. Elle traduit la présence de particules en suspension dans l'eau (débris organiques, argiles, organismes microscopiques...). Cependant une turbidité forte peut permettre à des micro-organismes de se fixer sur des particules en suspension. La turbidité est inversement proportionnelle à la transparence de l'eau (RéFEA, 2003).

### **I.5.1.2. Variables chimiques**

La mesure du pH (en UC) détermine la concentration des protons  $H^+$  contenus dans l'eau, et donc son acidité ou son alcalinité sur une échelle logarithmique de 0 à 14. Le pH influence la plupart des mécanismes chimiques et biologiques dans les eaux souterraines (RéFEA, 2003). Il est déterminé, en partie, par la nature géologique du bassin de drainage. Le pH est également influencé par la nature plus ou moins acide des pluies, l'activité biologique, et certains rejets industriels.

L'alcalinité (en  $mg/L^{-1} CaCO_3$ ) encore appelée Titre Alcalinité Complet (TAC) présente la somme des sels alcalins dissous dans un litre d'eau. La dureté totale ou Titre Hydrotimétrique (TH) (en  $mg.L^{-1} CaCO_3$ ) d'une eau correspond à la somme des concentrations en cations métalliques, à l'exception des métaux alcalins et des ions hydrogènes. La dureté est généralement due aux ions calcium et magnésium (Rodier *et al.*, 2009).

Etant l'un des plus importants indicateurs du degré de pollution des eaux, l'oxygène dissous (en pourcentage de saturation) participe aux processus chimiques et biologiques des milieux aquatiques (RéFEA, 2003).

La présence des ions ammonium (en  $mg.L^{-1} NH_4^+$ ) dans les eaux est souvent le signe d'une dégradation incomplète de la matière organique en relation avec le manque d'oxygène. C'est l'indice d'une contamination des eaux par des rejets d'origine humaine ou industrielle (Boulanouar, 1995). Les nitrites constituent quant à eux un stade intermédiaire, peu stable, entre les ions ammonium ( $NH_4^+$ ) et les nitrates ( $NO_3^-$ ). En dehors de tout apport externe, comme les 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 souterraine. En milieu naturel, leur concentration dépasse rarement 0,45 mg/L. Des valeurs supérieures à cette dernière indiquent des rejets d'eaux usées dans les

milieux aquatiques superficiels et souterrains, et surtout une utilisation excessive de fertilisants agricoles (Chapman & Kimstach, 1996).

Les Orthophosphates (en  $\text{mg.L}^{-1} \text{PO}_4^{3-}$ ) ont le plus souvent une origine urbaine (détergents) ou agricole (lessivage d'engrais). On considère généralement que les teneurs en phosphates constituent le facteur limitant des phénomènes d'eutrophisation (RéFEA, 2003).

La mesure de la conductivité électrique (en  $\mu\text{S/cm}$ ) 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.

### I.5.1.3. Variables organoleptiques

L'examen organoleptique de l'eau porte sur les variables ci-dessous (Tab.IV) :

**Tableau IV:** Variables organoleptiques de l'eau de boisson (OMS, 2011)

<b>Paramètres</b>	<b>Interprétations</b>
<b>Couleur (Pt.Co)</b>	permet d'estimer visiblement le ton, l'intensité et l'éventuelle évolution temporelle de la coloration. Une eau potable ne doit pas présenter de couleur particulière (incolore)
<b>Limpidité</b>	permet d'observer un film d'hydrocarbure, des matières flottantes, la formation de mousse, etc.
<b>Aspect et intensité d'une turbidité éventuelle</b>	sont caractérisés par sa transparence de l'eau et la présence ou l'absence de particules en suspension
<b>Aspect et qualité d'un Sédiment éventuel</b>	sont rendus par les matières minérales ou organiques très fines en suspension. On les évalue comme la limpidité. Une eau présentant la faible turbidité ne peut pas être qualifiée de limpide. Ces deux caractéristiques s'excluent mutuellement
<b>Odeur (UO/m<sup>3</sup>)</b>	est décrite par son type et son intensité. Par exemple l'odeur putride, de terre, de nature chimique rappelle le chlore, l'H <sub>2</sub> S (œuf pourri), les hydrocarbures, etc. Une eau potable ne doit pas dégager une odeur particulière (inodore)
<b>Saveur (g/L)</b>	est évaluée par le type et l'intensité du goût comme le ferait un dégustateur. Une eau potable ne doit pas avoir un goût particulier
<b>Sédiments ou Matières En Suspension (mg/L)</b>	sont visibles à l'œil nu. Ce sont, par exemple, les particules de matières organiques ou de limon, ainsi que celles qui sédimentent au fond du récipient

### **I.5.3. Évaluation basée sur la faune souterraine**

Parmi les communautés biologiques, celles dites stygofauniques sont les plus utilisées pour évaluer l'état de santé global des écosystèmes aquatiques (Gibert *et al.*, 1994; Srinivas *et al.*, 2011). Ce sont des organismes visibles à l'œil nu tels que les insectes, les mollusques, les crustacés et les vers, qui habitent le fond des cours d'eau et des lacs. Ils constituent un important maillon de la chaîne alimentaire des milieux aquatiques puisqu'ils sont une source de nourriture primaire pour plusieurs espèces de poissons, d'amphibiens et d'oiseaux. Ils sont reconnus comme de bons indicateurs de la santé des écosystèmes aquatiques en raison de leur sédentarité, de leurs cycles de vie variés, de leur grande diversité et de leurs tolérances variables à la pollution et à la dégradation de l'habitat. Ils intègrent les effets cumulatifs et synergiques à court terme (allant jusqu'à quelques années) des multiples perturbations physiques (modifications de l'habitat), biologiques et chimiques dans les cours d'eau. Ils sont abondants dans la plupart des rivières et faciles à récolter. De plus, leur prélèvement a peu d'effets nuisibles sur le biote résident (Barbour *et al.*, 1999).

### **I.5.4. Évaluation bactériologique**

L'évaluation de la qualité des eaux peut aussi se faire par la recherche de certaines bactéries indicatrices de pollution ; parmi ces dernières on a entre autres : la flore mésophile aérobie totale (FMAT), les coliformes totaux, les coliformes fécaux, les streptocoques fécaux, *Escherichia coli* et *Salmonella* spp.

#### **I.5.4.1. Flore mésophile aérobie totale**

La flore mésophile aérobie totale (FMAT) regroupe des bactéries capables de croître à des températures moyennes, en présence d'oxygène, et sur des milieux simples contenant une source de carbone (Jestin, 2000). Le dénombrement de FMAT dans une eau vise à estimer la densité de la communauté bactérienne, c'est-à-dire la salubrité de cette eau sans toutefois préciser les sources de contamination (Levallois & Levesque, 2003).

#### **I.5.4.2. Coliformes Totaux**

Les coliformes Totaux (CT) sont des bactéries en forme de bâtonnet, aérobies ou anaérobies facultatifs. Ils possèdent la  $\beta$ -galactosidase, enzyme permettant l'hydrolyse du lactose (CEAEQ, 2003) à 37°C, afin de produire des colonies rouges avec un reflet métallique sur un milieu gélosé approprié (Chevalier, 2003). Leur présence dans l'eau n'indique pas nécessairement une contamination fécale (Payment *et al.*, 2003). Ils existent dans les matières fécales mais se développent également dans les milieux naturels (Leyral *et al.*, 2002). La presque totalité des espèces de CT sont non pathogènes et ne représentent pas de risque direct

pour la santé, à l'exception de certaines souches de *Escherichia coli* ainsi que de rares bactéries pathogènes opportunistes (Edberg *et al.*, 2000).

#### I.5.4.3. Coliformes fécaux

Les coliformes fécaux (CF) sont des bactéries des genres *Escherichia*, *Klebsiella*, *Enterobacter* et *Citrobacter*. Ils fermentent le lactose à 44°C ou 45°C et apparaissent en grande quantité dans les déjections humaines ou animales. Ils sont incapables de survivre pendant longtemps dans le milieu extérieur. De ce fait, leur survie dans l'eau est à rapprocher de celles des bactéries pathogènes (Foppen & Schijven, 2006). Les coliformes fécaux ne se trouvent que chez les animaux à sang chaud, ce qui fait d'eux un indicateur intéressant. Leur présence dans l'eau trahit donc nécessairement une contamination fécale (Regnault, 1990). L'espèce la plus fréquemment associée à ce groupe bactérien est *E. coli*. La presque totalité des souches d'*E. coli* ne sont pas pathogènes, puisque cette bactérie est un hôte normal de l'intestin des mammifères (Rice, 1999). Toutefois, parmi les coliformes fécaux, *E. coli* est le seul qui soit sans équivoque toujours d'origine fécale et, à ce titre, est considéré comme l'organisme indicateur spécifique d'une pollution fécale. Le tableau V ci-dessous montre l'environnement naturel des coliformes.

**Tableau V:** Biotope naturel des coliformes (Graun *et al.*, 1997)

Fèces	Milieu aquatique et sol	Probablement non fécale
<i>Escherichia coli</i>	<i>Klebsiella terrigena</i>	<i>Klebsiella trevisanii</i>
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	<i>Enterobacter amnigenus</i>	<i>E. agglomerans</i>
<i>Klebsiella oxytoca</i>	<i>Enterobacter intermedium</i>	<i>E. gergoviae</i>
<i>Enterobacter cloacae</i>	<i>Serratia plymuthia</i>	<i>E. sakazakii</i>
<i>Enterobacter aerogenes</i>	<i>Serratia fonticola</i>	<i>Hafnia alvei</i>
<i>Citrobacter freundii</i>	<i>Rahnella aquatilis</i>	<i>Serratia marcescens</i>
<i>Citrobacter diversus</i>		<i>Serratia liquefaciens</i>
<i>Citrobacter amalonatae</i>		<i>Serratia odorifera</i>

#### I.5.4.4. Streptocoques fécaux

La recherche des streptocoques fécaux (SF) dans les milieux hydriques présente un intérêt certain car leur comportement diffère nettement de celui des coliformes. Leur caractère de bacilles à Gram positif leur confère une bonne résistance dans les milieux hydriques, permettant ainsi la mise en évidence de pollutions plus anciennes (Jestin, 2000).

Le rapport de Coliformes Fécaux sur Streptocoques Fécaux (CF/SF) est utilisé comme un élément informatif de premier ordre pour déterminer si une pollution fécale est d'origine animale, humaine ou mixte (Chevalier, 2003). Selon Borrego & Romero (1982), lorsque le rapport CF/SF < 0,7, la pollution fécale est principalement ou entièrement d'origine animale ; si CF/SF est compris entre 0,7 et 1, elle est mixte à prédominance animale ; si CF/SF est compris entre 1 et 2, elle est d'origine incertaine, CF/SF compris entre 2 et 4 elle est mixte à prédominance humaine, enfin quand CF/SF >4, la source de contamination est exclusivement humaine.

#### **I.5.4.5. *Staphylococcus aureus***

Les staphylocoques sont des bactéries ubiquitaires présentes sur la peau, les muqueuses et la sphère rhino-pharyngée chez les animaux à sang chaud (mammifères, volailles) et en particulier chez l'homme. Les staphylocoques ont également été isolés de l'environnement naturel (sol, eau douce et eau de mer, poussière, air), de l'environnement domestique de l'homme (cuisine, réfrigérateur), de l'environnement hospitalier, des ateliers de préparations alimentaires, et à partir de denrées alimentaires. La peau et les muqueuses de l'homme et des animaux constituent son habitat primaire ; sa présence dans l'environnement est vraisemblablement due à une contamination par l'homme ou les animaux (Bergdoll, 1979). *Staphylococcus aureus* est l'espèce la plus largement incriminée dans les toxi-infections alimentaires collectives (TIAC); il appartient au groupe des staphylocoques à coagulase positive.

Deux sous-espèces ont été décrites au sein de l'espèce *Staphylococcus aureus* (Rosenbach, 1884) et *S. aureus anaerobius* (De la Fuente *et al.*, 1985). Cette dernière sous-espèce a été isolée d'un abcès de mouton et possède des caractéristiques particulières (croissance en anaérobiose, catalase négative). Elle est très marginale car la quasi-totalité des souches de *Staphylococcus aureus* appartiennent à la sous-espèce *Staphylococcus aureus aureus*. Les principales caractéristiques de *Staphylococcus aureus* sont résumées ci-après :

- c'est une bactérie thermosensible, qui requiert des températures de croissance comprises entre 6 et 46°C (avec optimum à 37°C) ;
- elle a une gamme de pH optimal de croissance comprise entre 4 et 9,8 et survit dans des aliments déshydratés et/ou congelés ;
- elle tolère pour sa croissance une concentration en sels (NaCl) élevée (jusqu'à 20g/L) et une activité de l'eau  $a_w$  réduite (0,83) ;
  - elle est exigeante en acides aminés et en vitamines, ainsi sa croissance peut être inhibée par la présence de flores de compétition présentes dans les aliments ;

- son rôle pathogène en toxi-infection alimentaire collective (TIAC) est lié à la sécrétion de protéines douées de propriétés neurotoxiques chez l'homme qu'on appelle entérotoxines staphylococciques (Bergdoll, 1979).

#### **I.5.4.6. *Escherichia coli***

*Escherichia coli* a été mis en cause pour la première fois dans l'étiologie de l'entérite infantile lorsque Théodore Escherich isola ces micro-organismes lors des cas de diarrhées de nourrissons en 1885. *Escherichia coli* appartient à la famille des Enterobacteriaceae. C'est un bacille à coloration de Gram négative, non sporulé, anaérobie facultatif et qui ne possède pas d'oxydase. Le genre *Escherichia* compte 5 espèces : *E. coli*, *E. fergusonii*, *E. hermannii*, *E. vulneris* et *E. blattae*. L'espèce *Escherichia coli* est considérée comme un bionte normal, commensal de la microflore digestive de l'homme et de la plupart des animaux à sang chaud. En raison de sa prévalence élevée dans le tractus gastro-intestinal et dans les fèces, *Escherichia coli* est un indicateur privilégié de la contamination fécale lors de l'évaluation de la qualité de l'eau. Sa présence dans l'eau témoigne habituellement d'une contamination récente (Nola *et al.*, 2000). La plupart des souches d'*Escherichia coli* sont inoffensives lorsqu'elles sont contenues dans leur habitat naturel intestinal. Plusieurs autres souches d'*Escherichia coli* sont des agents pathogènes gastro-intestinaux dangereux pour les humains, et certaines sont également pathogènes pour les jeunes animaux d'élevage (FAO, 2011). La détection de cette bactérie dans une eau doit suspecter la présence possible d'autres microorganismes pathogènes d'origine entérique (Edberg *et al.*, 2000).

##### ✓ Sources et mode de transmission d'*Escherichia coli*

La principale voie de transmission d'*E. coli* est indirecte par consommation d'aliments d'origine animale ou végétale et d'eau de boisson contaminés par un environnement souillé, le plus souvent, par les matières fécales d'animaux infectés (Rodier *et al.*, 2009).

#### **I.5.4.7. *Salmonella spp.***

Les salmonelles appartiennent à la famille des Enterobacteriaceae. Ce sont des bacilles à Gram négatif, aéro-anaérobies facultatives, avec un métabolisme oxydatif et fermentaire, nicheurs facultatifs du tractus digestif. Leur température optimale de croissance se situe entre 35 et 37 °C (Rodier *et al.*, 1984). Les salmonelles sont généralement mobiles grâce à une ciliature péritriche. Elles mesurent en moyenne 0,8 µm de large sur 3,5 µm de long. Le réservoir principal des salmonelles est le tractus gastro-intestinal des mammifères (porcs et bovins) et des oiseaux (volailles domestiques). Certaines souches peuvent également être isolées d'autres sources telles que les animaux à sang froid (reptiles) et les animaux aquatiques (mollusques et poissons). Les salmonelles présentes dans les matières fécales des

animaux peuvent contaminer les pâturages, les sols et l'eau, et y survivre pendant plusieurs mois (Peter, 2010). Les infections à *Salmonella* spp. se manifestent par une gastro-entérite aiguë qui peut évoluer vers une forme septicémique ou localisée. Les infections à *Salmonella typhi* (fièvre typhoïde) et à *Salmonella paratyphi* A, B et C (fièvres paratyphoïdes) sont généralisées. Les fièvres paratyphoïdes sont souvent moins sévères que la fièvre typhoïde (Peter, 2010). Du point de vue médical, on peut observer des septicémies à point de départ lymphatique intestinal. Celles-ci présentent une incubation longue d'environ 15 jours. Elles sont sévères et se caractérisent par une forte fièvre, des troubles généraux accompagnés de troubles intestinaux plus ou moins accentués (douleurs abdominales, diarrhées (jus de melon) ou constipation), des pouls dissociés, hépatosplénomégalie possible. L'aggravation peut conduire au délire, à une prostration (Typhos), à des hémorragies intestinales avec perforation, collapsus cardiovasculaire. Le réservoir ici est strictement humain à savoir les selles des malades, des convalescents ou des porteurs sains. La contamination est directe manu portés, surtout indirecte par l'eau, les coquillages, les légumes (N'Diaye, 2008).

#### **I.5.4.8. Antibiotiques**

##### **I.5.4.8.1. Définition**

Un antibiotique est toute substance antibactérienne d'origine biologique, synthétique ou semi synthétique capable d'empêcher la multiplication des microorganismes (Webster, 1981). Brock (1967) quant à lui définit un antibiotique comme un agent chimique produit par un organisme et qui est nuisible à d'autres organismes.

##### **I.5.4.8.2. Classification des antibiotiques**

Les antibiotiques peuvent être classés selon plusieurs critères tels que leur origine (biosynthétisés), leur nature chimique (dérivés d'acides aminés, hétérosidiques ou polycycliques), leur mécanisme d'action, et leur spectre d'action. De toutes ses classifications, la plus souvent utilisée est celle faite par famille car elle possède un certain nombre de caractères communs tels que la composition chimique ou l'origine, le spectre d'action similaire ou très rapproché, les cibles bactériennes identiques, la résistance bactérienne, et les effets indésirables rapprochés (Yala *et al.*, 2001).

##### **I.5.4.8. 3. Mode d'action des antibiotiques**

Le pouvoir antimicrobien de la plupart des classes d'antibiotiques concerne certaines caractéristiques uniques de la structure bactérienne ou de leurs processus métaboliques (Tableau VI).

**Tableau VI:** Modes d'action des principales classes et molécules d'antibiotiques (UE, 2010 ; Talaro & Chess, 2012; Hong *et al.*, 2014; Yao, 2019)

Classes	Molécules	Modes d'action antibactérienne	Spectre d'activité
Sulfamidés	Toutes les substances appartenant au groupe des sulfamidés	Ils inhibent la synthèse des folates par l'action des inhibiteurs compétitifs de la dihydroptéroate synthétase	Cocci à Gram positif
Quinolones	Acide oxolinique, Difloxacin, Sarafloxacin, Danofloxacin, Enrofloxacin, Flumequine, Marbofloxacin	Ils inhibent la gyrase de l'ADN bactérien ou la topoisomérase IV, et par conséquent inhibent la réplication et la transcription de l'ADN	Large spectre sur <i>Mycobacterium tuberculosis</i> (fluoroquinolones, en combinaison avec d'autres antimycobactériens)
Bêta-lactamines	Amoxicilline, Ampicilline, Benzylpénicilline, Céfalexine, Céfacétrile, Céfalonium, Céfapirine, Céfapéradone, Cefquinone, Ceftiofur, Céfazoline, Cloxacilline, Céfoperazone, Pénéthamate, Dicloxacilline, Nafcilline, Oxacilline	Ils perturbent la synthèse de la couche de peptidoglycane des parois cellulaires bactériennes en se liant aux protéines contribuant à cette synthèse	Cocci à Gram positif, Bactéries à Gram positif et Gram négatif, <i>Treponema pallidum</i> , <i>Borrelia</i>
Tétracyclines	Chlortétracycline, Doxycycline, Oxytétracycline, Tétracycline	Ils se lient aux sous-unités ribosomales 30S en inhibant la liaison de l'aminoacyl-ARNt au complexe ARNm-ribosome	<i>Treponema pallidum</i> , <i>Chlamydia</i> , <i>Borrelia</i> , Rickettsie, <i>Plasmodium falciparum</i>
Aminoglycosides	Dihydrostreptomycine, Gentamicine, Kanamycine, Néomycine, Streptomycine, Paromomycine, Apramycine, Spectinomycine	Ils se lient à la sous-unité 30S du ribosome bactérien (certains se lient à la sous-unité 50S) en inhibant la translocation du peptidyl-ARNt du site A au site P et en causant une lecture erronée de l'ARNm	Bactéries à Gram positif et Gram négatif (comportant <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ), <i>Mycobacterium tuberculosis</i>
Phénolés	Thiamphénicol, Florfenicol	Ils se lient aux sous-unités 50S du ribosome en empêchant la formation de la liaison peptidique	<i>Neisseria meningitidis</i> , <i>Salmonella typhi</i>

Macrolides	Erythromycine, Spiramycine, Tylosine, Tilmicosine, Gamithromycine, Tulathromycine, Tylvalosine, Tildipirosine	Ils se lient réversiblement aux sousunités 50S du ribosome de la bactérie en inhibant la translocation du peptidyl-ARNt	Cocci à Gram positif, <i>Treponema pallidum</i> , pathogènes intracellulaires, <i>Mycoplasma</i> , <i>Plasmodium falciparum</i>
Lincosamides	Lincomycine, Pirlimycine	Ils se lient aux sous-unités 50S du ribosome en inhibant la transpeptidation /translocation	Cocci à Gram positif, anaérobies (clindamycine), <i>Plasmodium falciparum</i> (clindamycine)
Polypeptides	Bacitracine, Colistine, Tyrothricine	Ils réagissent fortement sur les phospholipides membranaires et perturbent le fonctionnement et la perméabilité de ces membranes	Bactéries à Gram positif et Gram négatif, <i>Bacillus polymyxa</i> , <i>Bacillus subtilis</i>
Orthosomycines	Avilamycine		Bactéries à Gram positif
Rifamycines	Rifamycine SV, Rifaximine, Rifampicine	Ils bloquent la synthèse des ARN-messagers	Coques à Gram positif et à Gram négatif, bacilles à Gram positif large spectre
Ionophores	Salinomycine, Monensin		Bactéries à Gram positif, coccidiostatique
Novobiocine	Novobiocine	Ils inhibent la réplication de l'ADN	Coques à Gram positif et à Gram négatif, bacilles à Gram positif, <i>Haemophilus</i> , <i>Pasteurella</i>
Pleuromutilines	Tiamuline, Valnemuline	Ils inhibent la synthèse protéique au niveau de l'unité 50S des ribosomes	Large spectre

Les mécanismes d'action des antibiotiques :

✓ Inhibition de la synthèse de la paroi cellulaire

La paroi est constituée essentiellement de peptidoglycane (PG) ou mucopeptide, qui est une macromolécule polysaccharidique constituée par une succession régulière d'acétoglucosamine et d'acide N-acétylmuramique. Ces acides aminés se constituent en petits peptides et ceux-ci sont reliés entre eux par des ponts peptidiques conférant une grande rigidité à l'ensemble. Des antibiotiques tels que les pénicillines, les carbapénèmes et les céphalosporines sont capables de bloquer la réticulation des unités peptidoglycanes, en inhibant la formation de liaisons peptidiques catalysée par les PLP (protéines de liaisons des pénicillines) (Josephine *et al.*, 2004). La plupart des antibiotiques de la classe des

glycopeptides (par exemple, la vancomycine) sont capables d'inhiber la croissance bactérienne. Ils inhibent ainsi la synthèse de PG en se liant à des unités de PG, et bloquant l'activité de la transglycosylase et de la transpeptidase (Kahne *et al.*, 2005).

✓ Désorganisation de la structure ou de la fonction de la membrane cellulaire

Les classes d'antibiotiques qui endommagent les membranes cellulaires des bactéries sont spécifiques à chaque groupe microbien en fonction des différences de types de lipides dans leurs membranes cellulaires. Par exemple, la Daptomycine dépolarise la membrane dépendante du calcium ; ceci conduit à la cessation de la synthèse macromoléculaire et à la perturbation de la membrane cellulaire chez les bactéries (Alborn *et al.*, 1991). Les polymyxines provoquent la désintégration de la membrane cellulaire bactérienne en se liant efficacement au fragment lipidique du lipopolysaccharide dans la cellule bactérienne (Falagas *et al.*, 2010).

✓ Inhibition de la synthèse d'acide nucléique

Les antibiotiques interfèrent avec la synthèse de l'acide nucléique en bloquant la réplication ou en arrêtant la transcription. La réplication de l'ADN implique le dénouement de la structure traditionnelle à double hélice, un processus facilité par une hélicase (Gale *et al.*, 1981). Les antibiotiques de la famille des quinolones, par exemple, interfèrent avec la fonctionnalité de l'enzyme hélicase, empêchant ainsi cette enzyme de jouer son rôle de déroulement de l'ADN. Cette action tronque finalement le processus de réplication et de réparation de l'ADN des bactéries sensibles aux quinolones (Chen *et al.*, 1996). Les antibiotiques dont le mode d'action est l'inhibition de la synthèse d'acide nucléique ciblent également la topoisomérase II et la topoisomérase IV de la bactérie. La perturbation des activités de ces enzymes chez les bactéries affecte négativement l'ARN polymérase, ce qui empêche la synthèse de l'ARN. Les quinolones qui inhibent de cette manière la synthèse d'acide nucléique bactérienne n'interagissent pas avec l'ARN polymérase de mammifère ; ceci les rend particulièrement antagonistes vis-à-vis des bactéries à Gram positif et de certaines bactéries à Gram négatif.

✓ Inhibition de la synthèse des protéines

Les antibiotiques qui inhibent la synthèse des protéines font partie des classes les plus larges d'antibiotiques et peuvent être divisés en deux sous-classes : les inhibiteurs de 50S et les inhibiteurs de 30S. Des antibiotiques tels que l'érythromycine, la clindamycine, la lincomycine, le chloramphénicol, le linézolide, etc. font partie des inhibiteurs du ribosome

50S (Katz & Ashley, 2005). En termes généraux, les antibiotiques qui inhibent le ribosome 50S le font en bloquant physiquement soit la phase d'initiation de la traduction protéique, soit la phase d'élongation de la synthèse protéique où l'acide aminé entrant est lié à la chaîne peptidique naissante en croissance (Patel *et al.*, 2001). Les inhibiteurs du ribosome 30S agissent principalement en bloquant l'accès des aminoacyl-ARNt au ribosome. Les exemples d'antibiotiques qui fonctionnent de cette manière comprennent la tétracycline, la streptomycine, la spectinomycine, etc. (Hong *et al.*, 2014). Il est intéressant de noter que la tétracycline inhibe également certaines protéines au niveau des ribosomes 50S (Epe & Woolley, 1984). Parmi les inhibiteurs du ribosome, la sous-classe des aminoglycosides, d'origine naturelle, est la seule à être largement bactéricide. Les macrolides, les streptogramines, la spectinomycine, les tétracyclines et le chloramphénicol sont généralement bactériostatiques.

✓ Blocage des principales voies métaboliques

Certains antibiotiques, tels que les sulfamides et le triméthoprim, imitent un substrat nécessaire au métabolisme cellulaire des bactéries. Cette imposture fait que les enzymes bactériennes s'attachent à l'antibiotique plutôt qu'au substrat normal. En particulier, les sulfamides agissent comme le tétrahydrofolate nécessaire à la synthèse de l'acide folique dans les cellules bactériennes (Talaro & Chess, 2012). L'acide folique est essentiel dans le métabolisme des acides nucléiques et des acides aminés.

## **CHAPITRE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES**

## II.1. MATERIEL

### II.1.1. Zone d'étude : Ville de Moundou (Fig.2)

Créée en 1923 par les colons français, Moundou, ville économique du Tchad est construite sur une cuvette plate en bordure du fleuve Logone. Moundou, Chef-lieu de la Province du Logone Occidental au Sud du Tchad, est située entre 08°32'20,1'' et 08°33'11,8'' de latitudes Nord et entre 16°03'59,3'' et 16°04'45,0'' de longitudes Est. Ses zones inondables s'étendent sur environ 1000 ha représentant 47% de la superficie totale de la ville qui est de 22 km<sup>2</sup> (PADUR-Tchad, MATUT, 2008). Moundou se situe dans une zone soudano-guinéenne. Sa population, estimée à environ 148 303 habitants (INSEED, 2009), est passée une décennie après à de 173 000 personnes avec une densité brute de 79 hab./ha (Initiative-Developpement, 2019). Ses quartiers périphériques sont construits généralement dans des zones inondables non assainies. En dehors des quartiers résidentiels et de son Marché Central, le reste de la ville de Moundou demeure dans de zones de fortes inondations. Les quartiers les plus touchés par le phénomène de stagnation d'eau sont Djarabé, Dombao, le sud de Gueldjem, le sud de Mbombaya et le nord de Quinze ans. Le nord du quartier Doyon est touché par le problème de débordement du Lac Weye.

Le Sud et l'Est de la ville sont occupés par des unités industrielles : l'Usine d'Egrenage du Coton Graine, Les Brasseries du Tchad (BDT), et la Manufacture des Cigarettes du Tchad (MCT). Toutefois, l'agriculture occupe une partie très importante de la main d'œuvre locale ; elle est suivie de l'élevage, le commerce, la pêche et, dans une moindre mesure, l'artisanat (PADUR-Tchad, 2008). L'extension de la ville s'opère à l'Ouest vers les quartiers Djarabé et au Nord vers les quartiers Quinze Ans, Doumbeur et Koutou. Les sols du Logone Occidental sont ferrallitiques et ferrugineux, composés essentiellement de grés et d'argiles. Dans cette province et précisément dans la ville de Moundou et ses environs, le couvert végétal est constitué des forêts claires et de savanes arborées forestières. Les espèces végétales rencontrées sont *Parkia biglobosa*, *Bytyrospermum parkii*, *Khaya senegalensis*, *Tamarindus indica*, *Andasonia digitata* etc. (Bonodji, 2012). La province du Logone occidental est longée dans sa limite sud, à l'Est et au Nord-Est par le fleuve Logone, long de 1000 km. Il existe deux petits lacs dans la commune de Moundou : le Lac Wey et le Lac Taba. La commune est serpentée par de petites rivières et des marigots. La crue du Logone, des lacs et des rivières provoque l'inondation des zones aux alentours et quelques fois dans la ville de Moundou.

La ville de Moundou partage sa frontière ouest avec la République du Cameroun et la province du Mayo-Kebbi Ouest ; elle est limitée au Nord par le Département de la Tandjilé Ouest, à l'Est par le Département de la Tandjilé Est, au Centre et au Sud par la province du

Logone Oriental. La ville de Moundou est administrativement divisée en quatre arrondissements avec 27 quartiers sous la direction de la Mairie Centrale.

## **II.1.2. Stations d'échantillonnage**

### **II.1.2.1. Choix des stations d'échantillonnage**

Les stations d'échantillonnage ont été choisies en fonction de leur accessibilité, l'intérêt que les populations manifestent pour ces points d'eau, l'emplacement par rapport aux sources superficielles de pollution, l'état morphologique et hydrologique entre autres. La première phase (de prospection) s'est déroulée de janvier à mars 2019 ; elle a consisté au choix de puits selon les critères dont les plus importants ont été : la taille de la population par localité, leur accessibilité, l'utilité et leur proximité avec les sources de pollution. A l'issue de cette phase de prospection, au total 50 puits répartis dans les quatre arrondissements de la ville de Moundou ont été choisis à raison de 6 puits dans le 1<sup>er</sup> arrondissement, 8 puits dans le 2<sup>e</sup> arrondissement, 15 puits dans le 3<sup>e</sup> arrondissement et 21 puits dans le 4<sup>e</sup> arrondissement (Tableau I). La seconde phase d'exécution allant de mai 2019 à juillet 2020 a consisté aux prélèvements des échantillons d'eaux pour les analyses physicochimiques, bactériologiques et faunistiques des puits en 4 campagnes de prélèvements suivant une fréquence saisonnière. La Figure 2 montre la localisation des stations échantillonnage dans la ville de Moundou. Les puits sont codifiés de P1 à P50.

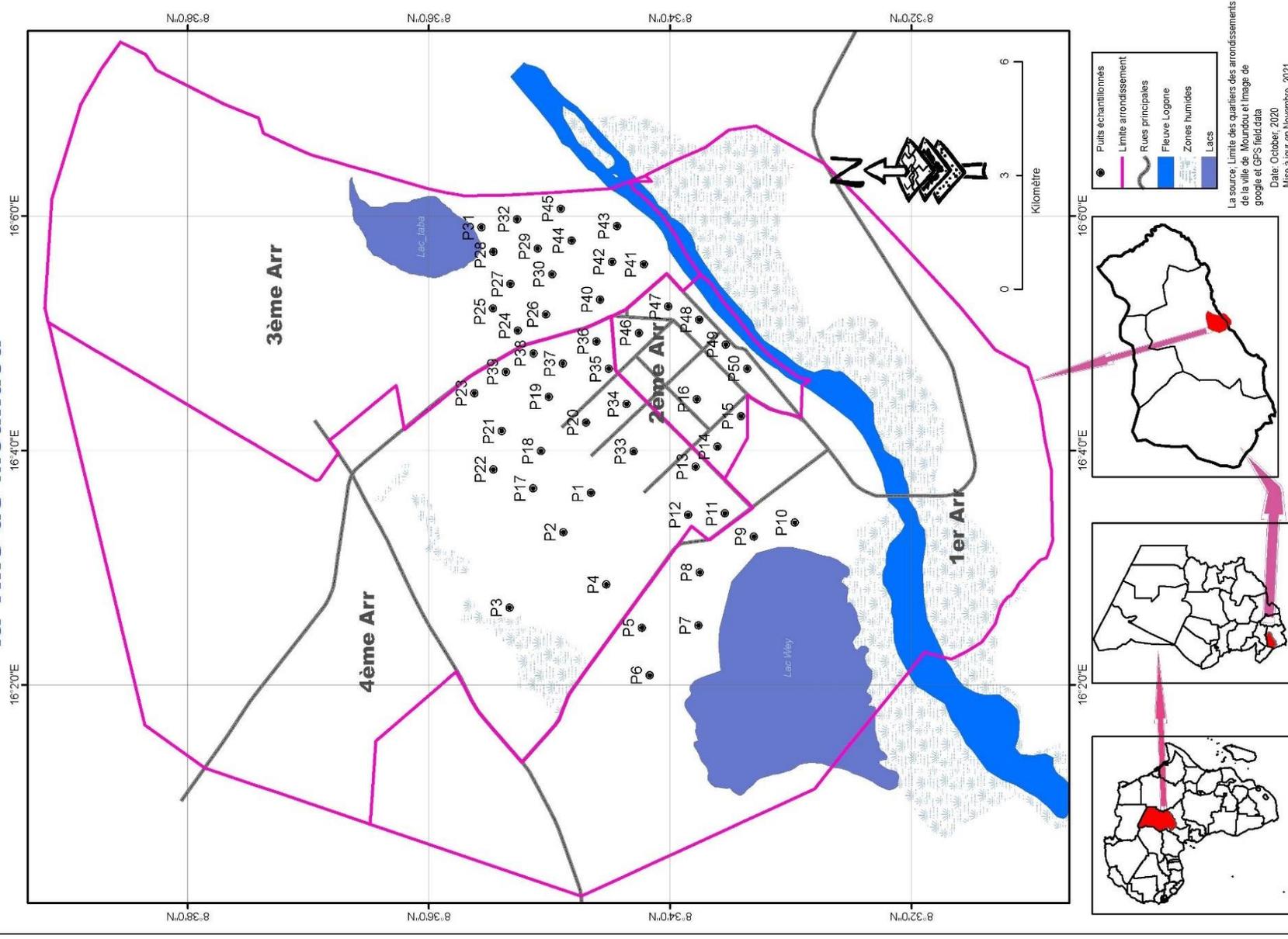
### **II.1.2.2. Caractéristiques des arrondissements et répartition des puits par quartier dans la ville de Moundou**

Les caractéristiques des arrondissements de la ville de Moundou où les puits ont été choisis sont regroupées dans le tableau VII ci-dessous. Sur les 27 quartiers de la commune de Moundou, 21 ont fait l'objet de cette étude.

**Tableau VII** : Caractéristiques des arrondissements et répartition des puits par quartier dans la ville de Moundou

<b>Arrondissements</b>	<b>Caractéristiques des arrondissements</b>	<b>Nombre de quartiers N= 21</b>	<b>Nombre de puits N=50</b>
<b>I</b>	Présence d'unités industrielles : -Usine d'égrenage du coton graine en coton -Les Brasseries du Tchad (BDT), -Manufacture des Cigarettes du Tchad (MCT) - Débordement du Lac Wey qui se deverse au quartier	Doyon, Dokab	<b>6</b>
<b>II</b>	Présence du Marché Central	Dombao, Baguirmi, Haoussa, Guelbé, Mbomian	<b>8</b>
<b>III</b>	-Quartiers touchés par le phénomène, de stagnation d'eau -Débordement du Lac-Taba - Zone de culture (Riz, mil, sorgho, manioc)	Doumbour I, Guelkoura, Quinze ans (I et II) et Lac-Taba	<b>15</b>
<b>IV</b>	-Quartiers construits généralement dans des zones inondables -Zone d'agriculture et l'élevage	Gueldjem I et II, Djarabé I et II, Doumbour II et Guelkol (I et II)	<b>21</b>

# Localisation des puits échantillonnés dans la ville de Moundou



**Figure 2 :** Emplacement des stations d' échantillonnage dans la ville de Moundou  
Arr= Arrondissement

**Source :** Limites des arrondissements de la Ville de Moundou, image google et coordonnées GPS

### **II.1.3. Caractéristiques climatiques de la zone d'étude**

Le territoire tchadien présente une variation climatique importante avec un passage progressif du Sud au Nord, d'un climat tropical semi humide à un climat désertique ; il s'agit des climats soudano-guinéen puis soudanien jusqu'au 10<sup>ème</sup> parallèle, sahélo-soudanien jusqu'au 14<sup>ème</sup> parallèle, sahélo-saharien jusqu'au 15<sup>ème</sup> parallèle puis saharien (DREM, 2012). La ville de Moundou se situe dans la zone soudano-guinéenne.

#### **II.1.3.1. Température**

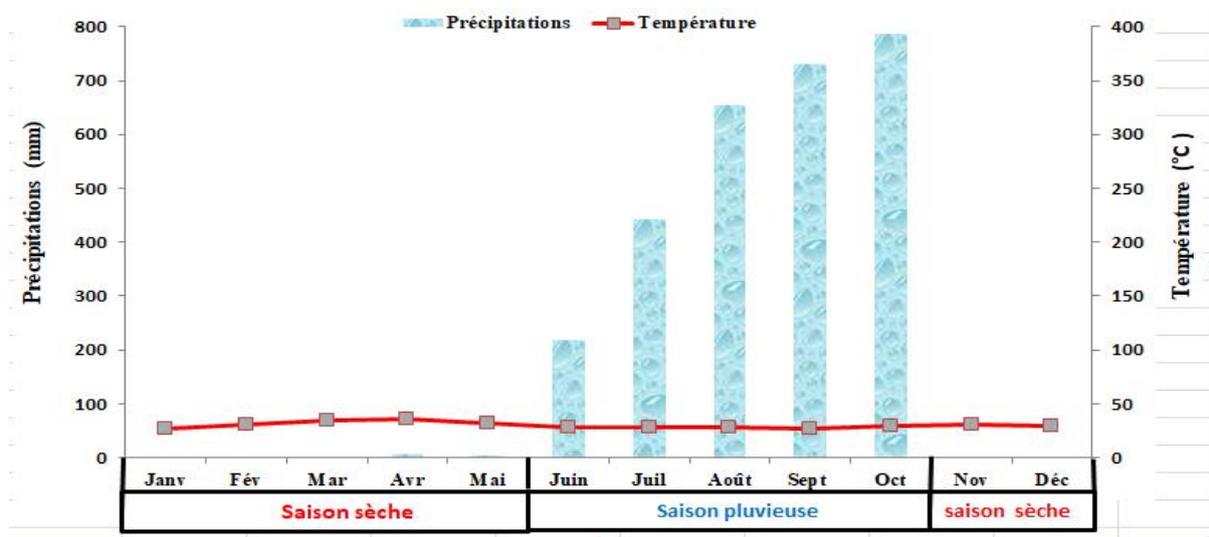
A Moundou, la température la plus basse est observée en décembre et janvier (18°C) et la plus élevée en avril et mi-mai (40°C à l'ombre). La température moyenne annuelle est de 26,2°C. L'amplitude thermique tout au long de l'année est de 7,1°C (DREM, 2012).

#### **II.1.3.2. Pluviométrie**

Dans le Logone Occidental, la saison pluvieuse s'étend habituellement sur 5 à 6 mois (Juin à octobre voire novembre) et la saison sèche sur 6 à 7 mois (novembre ou décembre à mai) avec une période froide (décembre, janvier). La pluviométrie annuelle varie de 1000mm à 1200mm de hauteur de pluies. Les premières pluies commencent généralement en avril et prennent fin en octobre ou novembre (DREM, 2012).

#### **II.1.3.3. Diagramme ombrothermique de la période d'étude**

Le diagramme ombrothermique de la période d'étude est présenté à la figure 3. Les mois de novembre, décembre, janvier, février, mars, avril et mai, sont les plus secs et correspondent à la saison sèche tandis que les cinq autres mois correspondent à la saison pluvieuse. La moyenne des pluies a été de 561,49 mm en 2019 et de 145,68 mm en 2020. Les mois les plus pluvieux pendant la période d'étude ont été les mois de juillet, août et septembre avec des valeurs moyennes respectives de 729,95 mm, 786,25 mm et 654,55 mm. Les températures les plus élevées ont été enregistrées aux mois de mars, avril et mai avec des valeurs moyennes respectives de 34,70°C, 35,30°C et 31,95°C.



**Figure 3 :** Diagramme ombrothermique de la période d'étude de janvier 2019 à décembre 2020 dans la ville de Moundou.

(Source : Agence Nationale pour la Météorologie (ANAM), Tchad ; Météo-Climat : Tutiempo.net, 2019-2020).

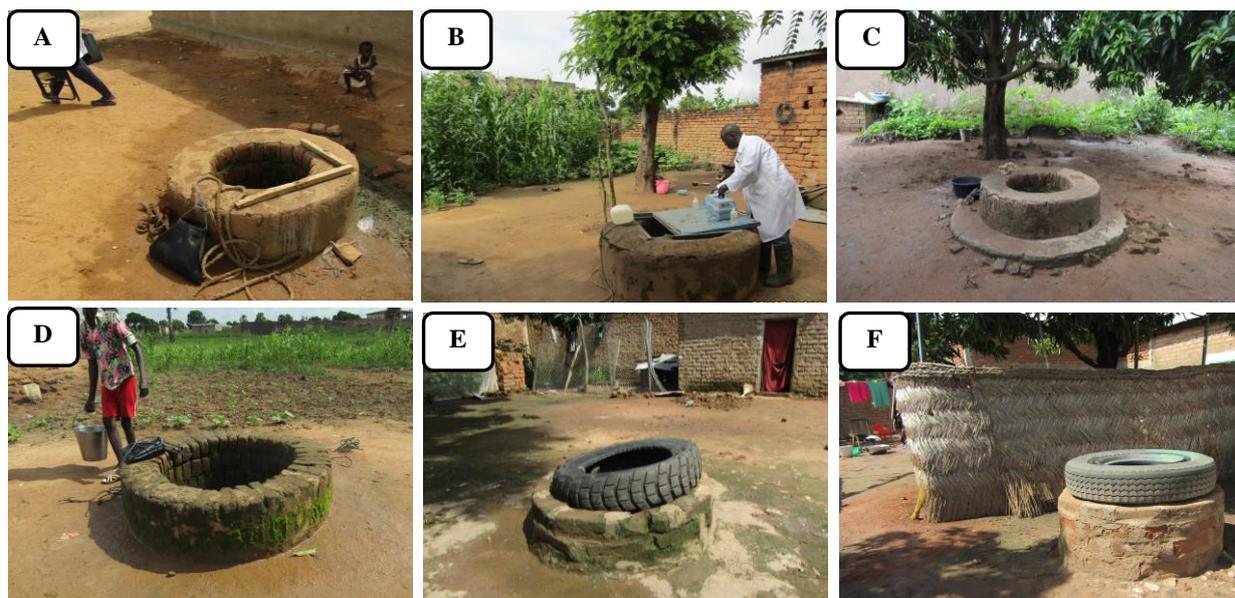
#### II.1.3.4. Description des stations d'échantillonnage

Les paramètres morphométriques qui nous ont permis de décrire nos stations ont été la profondeur totale du puits (Prof), la hauteur de la margelle (Hmarg), le type de margelle (Tmarg), le diamètre (Dtre), l'ouverture (Ouv.) et la fermeture (Ferm.) des puits. Les paramètres hydrologiques mesurés ont été l'épaisseur de la colonne d'eau (CE) et le niveau piézométrique (NP). La distance aux latrines (Dlat), l'altitude (Alt) et les coordonnées GPS (Global Positioning System) ont été relevés pour chaque station d'étude. Les deux derniers paramètres ont été pris sur le terrain à l'aide d'un GPS 60 de marque GARMIN pour la réalisation des cartes des stations d'échantillonnage.

##### II.1.3.4.1. Puits du 1<sup>er</sup> arrondissement

Six puits ont été échantillonnés dans le premier arrondissement, soit deux puits au quartier Doyon et quatre autres au quartier Dokab (Fig.4). Parmi ces puits, quatre ont des margelles en béton (puits du quartier Dokab) et deux autres ont des margelles en béton et roue (puits du quartier Doyon). La hauteur de ces différentes margelles a varié de 0,4 à 0,68 m. Les margelles les plus hautes ont été celles faites en béton et roue. Un puits sur les six échantillonnés est souvent fermé (puits du quartier Dokab) tandis que les cinq autres puits du quartier Dokab et du quartier Doyon sont souvent ouverts. Les puits du quartier Dokab sont mieux entretenus et ont la hauteur de la colonne d'eau la plus importante (7 m en moyenne). Le puits le plus profond est situé au quartier Doyon (20,79 m). Les six puits du 1<sup>er</sup> arrondissement ont en moyenne un diamètre de 1 m avec une distance moyenne aux latrines de 16 m. Leurs

eaux sont utilisées pour tous les usages quotidiens et pour le jardinage en raison de la faiblesse et du manque du système d'adduction en eau potable dans ces quartiers de la ville.



**Figure 4 :** Puits échantillonnés dans le 1<sup>er</sup> arrondissement de la ville de Moundou  
A= P5, B= P6, C=P7, D=P8, E=P9, F=P10

#### II.1.3.4.2. Puits du 2<sup>e</sup> arrondissement

Huit puits ont été échantillonnés dans six quartiers du deuxième arrondissement à savoir Dombao (02), Mbomian (02), Mbombaya (01), Guelbé (01), Haoussa (01) et Baguirmi (01) (Fig.5). Cinq sur huit de ces puits ont des margelles en béton (Fig. 5), parcontre les puits des quartiers Mbomian, Haoussa et Baguirmi qui ont une margelle en roue. La hauteur de ces différentes margelles a varié de 0,47 à 0,64 m. Cinq puits sur les huit échantillonnés sont constamment couverts ; il s'agit des puits P14, P15 de Dombao, P48, P49 et P50 de Mbomian, Haoussa et Baguirmi respectivement. Les puits P15, P49 et P50 sont les moins bien entretenus avec des margelles en troncs d'arbres, en pneus usés, et les parois des puits sont non cimentés. Les puits du deuxième arrondissement ont une profondeur moyenne de 6,75 m et ont les plus faibles hauteurs de la colonne d'eau par rapport aux autres stations (hauteur moyenne de la colonne d'eau est de 3,8 m). Ces puits ont un diamètre de 0,76 à 1,6 m ; leurs eaux sont utilisées pour tous les usages quotidiens et pour le jardinage.



**Figure 5:** Puits échantillonnés dans le 2<sup>e</sup> arrondissement de la ville de Moundou  
 A= P14, B= P15, C=P16, D=P46, E=P47, F=P48, G=P49 et H=P50)

#### II.1.3.4.3. Puits du 3<sup>e</sup> arrondissement

Quinze puits dont l'eau été échantillonnée dans cinq quartiers du troisième arrondissement à savoir Doumbeur (07), Guelkoura (02), 15Ans I (01) et 15Ans II (03) et Lac-Taba (02) (Fig.6). Parmi ces puits, treize ont des margelles en béton, un puits avec une margelle en roue et un seul puits avec une margelle en bois. Les puits P27, P30 et P31 ont des margelles en état de dégradation avancée. La hauteur de ces différentes margelles varie de 0,2 à 0,9 m. Presque tous les puits sont non couverts, sauf le puits P32 ; toutefois, ils ont un bon niveau d'entretien (propriété autour des puits) à l'exception des puits P42 (situé à côté d'un dépôt d'ordures ménagers) et P44 (margelle presque nulle) qui ont un niveau d'entretien médiocre. Ici, la hauteur de la colonne d'eau est importante et varie de 2,22 (P31) à 9,6 m (P28); le diamètre du puits varie de 0,3 (P30) à 1,64 m (P44), et la profondeur de 3,58 m (P32) à 14,7 m (P28). Les eaux de ces puits sont utilisées pour les activités domestiques et pour le jardinage.



**Figure 6:** Puits échantillonnés dans le 3e arrondissement de la ville de Moundou  
 A= P24, B= P25, C=P26, D=P27, E=P28, F=P29, G= P30, H= P31, I=P32, J=P40,  
 K=P41, L=P42, M=P43, N=P44, O=P45.

#### **II.1.3.4.4. Puits du 4<sup>e</sup> arrondissement**

Vingt et un puits ont été échantillonnés dans sept quartiers du quatrième arrondissement à savoir Gueldjem I (04), Gueldjem II (02), Djarabé I (02), Djarabé II (03), Doumbeur II (05), Guelkol I (03) et Guelkol II (02) (Fig.7). Tous ces puits ont des margelles en béton à l'exception des puits P23, P35 et P37 dont les margelles, en béton, sont surmontées des roues (Fig.7). La hauteur de ces différentes margelles varie de 0,5 à 1m. Dix-huit puits sur les vingt et un échantillonnés sont constamment couverts, excepté les puits P13, P33 et P38 (Fig.7) qui sont bien entretenus et sont souvent fermés. Les puits du quatrième arrondissement sont peu profonds (profondeur moyenne de 10,77 m) par rapport à ceux des trois autres arrondissements. La hauteur moyenne de la colonne de ces eaux est de 7,34 m avec un diamètre compris entre 0,74 à 1,6 m. Les eaux de ces puits sont utilisées pour tous les usages quotidiens et pour le jardinage.



**Figure 7:** Puits échantillés dans le 4<sup>e</sup> arrondissement de la ville de Moundou  
 A= P1, B= P2, C=P3, D=P4, E=P11, F=P12, G= P13, H= P17, I=P18, J=P19, K=P20,  
 L=P21, M=P22, N=P23, O=P33, P=P34, Q=P35, R=P36, S=P37, T=P38, U=P38.

## **II.2. METHODES**

### **II.2.1. Échantillonnage de l'eau et récolte de la stygofaune**

#### **II.2.1.1. Échantillonnage d'eau pour les analyses physicochimiques**

Pour caractériser la qualité physicochimique des eaux des puits, plusieurs facteurs ont été étudiés selon les méthodes d'analyses préconisées par APHA (1998) et Rodier *et al.*(2009). Les prélèvements pour les analyses physicochimiques de l'eau ont été effectués dans les puits à l'aide des puisettes des propriétaires puis transvasés sans faire de bulles dans les flacons en polyéthylène de 250 mL et 1000 mL à double bouchage, et ramenés au laboratoire en enceinte réfrigérée.

#### **II.2.1.2. Échantillonnage d'eau pour les analyses bactériologiques**

Le prélèvement des échantillons d'eaux a été fait au niveau de la margelle à environ 50 cm de la surface libre, à l'aide des puisettes des propriétaires. Ce prélèvement a été effectué à l'aide des flacons en verre stériles de 250 ml dans des conditions d'asepsie avec la flamme du chalumeau. Ces échantillons ont été (1) conservés dans une glacière munie de carboglace pour maintenir la température à 4°C, et (2) acheminés au laboratoire pour des analyses (Rodier *et al.*, 2009).

#### **II.2.1.3. Échantillonnage de la stygofaune**

La récolte de la faune a été faite après des prélèvements des eaux destinées aux analyses physicochimiques et bactériologiques suivant le protocole décrit par le guide Pascalis (2009). Les organismes des puits ont été échantillonnés à l'aide d'un filet phréatobiologique de Cvetkov (Cvetkov, 1968) modifié, de 40 cm de diamètre à l'ouverture, muni d'un cône filtrant avec un vide de maille de 150µm et d'une toile fine monté sur un cercle métallique. A la base de ce cône est rattachée une valve (Aluminium et clapet en caoutchouc) qui permet l'entrée de la faune nageuse lors de la remontée du filet et empêche leur perte pendant la redescende (Boutin & Boulanouar, 1983). Une fois au fond du puits, une série de 10 à 15 tractions est exercée afin de remuer le substrat pour le mettre en suspension et pouvoir ainsi récolter la faune qui s'y trouve (Artheau, 2002). Le filet étant remonté, on obtient un échantillon de la faune présente dans le puits, au niveau du substrat et dans la colonne d'eau. Ces échantillons contenant les organismes ont été introduits dans des flacons puis fixés à l'alcool à 96%, et ramenés au laboratoire.

### **II.2.2. Analyse des échantillons**

Au total, deux cent (200) échantillons d'eau ont été prélevés dans 50 puits de la ville de Moundou et analysés.

### **II.2.2.1. Analyses physicochimiques**

Pour caractériser physicochimiquement les eaux, plusieurs paramètres ont été étudiés selon les méthodes d'analyses préconisées par APHA (1998) et Rodier *et al.*, 2009. Quelques-uns ont été mesurés sur le terrain (*in situ*) tandis que d'autres ont été mesurés au laboratoire.

#### **II.2.2.1.1. Paramètres mesurés sur le terrain**

##### **II.2.2.1.1.1. Température**

La température de l'eau a été mesurée «in situ » à l'aide d'un conductimètre multifonctionnel HACH HQ40d. Les résultats sont exprimés en degré Celsius (°C) avec une précision de 1%.

##### **II.2.2.1.1.2. Potentiel d'Hydrogène (pH)**

Les mesures de pH ont été réalisées à l'aide d'un Conductimètre portatif HACH HQ40d. Les résultats sont exprimés en unité conventionnelle (UC) avec une précision de  $1/10^e$ .

##### **II.2.2.1.1.3. Conductivité électrique (CE)**

La conductivité électrique a été évaluée « in situ » à l'aide d'un Conductimètre portatif multi-paramètres HANNA (OAKTON). Les résultats sont exprimés en  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . avec une précision de 1%.

##### **II.2.2.1.1.4. Solides Totaux Dissous (TDS)**

La quantité des TDS a été mesurée à l'aide d'un TDS/Conductimètre portatif HANNA(OAKTON). Les résultats sont donnés en  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

##### **II.2.2.1.1.5. Oxygène dissous (O<sub>2</sub>)**

Le taux d'oxygène dissous a été déterminé «in situ » au moyen d'un oxymètre de marque HACH HQ40d. Les valeurs sont données en pourcentage de saturation.

##### **II.2.2.1.1.6. Paramètres mesurés au laboratoire**

Les méthodes utilisées et les analyses faites au laboratoire sont le dosage volumétrique, la spectrométrie et la respirométrie suivant les recommandations de Rodier *et al.*(2009) et de la norme NF T90-036.

##### **II.2.2.1.1.7. Bicarbonates**

La recherche des alcalinités a été utilisée pour mesurer le titre alcalimétrique complet (TAC) ou des ions bicarbonates. L'ion  $\text{HCO}_3^-$  a été titré par volumétrie. Cinquante (50) mL d'échantillon d'eau ont été prélevés dans l'Erlenmeyer. 2 à 4 gouttes d'indicateur coloré mixte (le rouge vert de méthyl bromocrésol y ont été ajoutées. La solution qui a pris une

coloration verte, a été titrée avec une solution d'acide sulfurique 0.02N jusqu'au virage rouge clair persistant. Le titre utilisé est le HACH Digital Titrator Model 16900.

Les résultats sont obtenus avec la formule suivante :

Quantité de  $\text{HCO}_3^-$  (mg/L) =  $V_1/V_e \times 0.02 \times 1000 \times 61$  avec

$V_1$  : volume d'acide  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,02 N versé (ml)

$V_e$  : volume d'échantillon ou une dilution de l'échantillon utilisé ( $V_e = 50$  ml)

$$\text{HCO}_3^- \text{ (mg/L)} = V_1 \times 24,4$$

$$\text{Si } V_e = 100\text{ml} \quad \text{HCO}_3^- \text{ (mg/L)} = V_1 \times 12,2$$

#### **II.2.2.1.1.8. Dureté totale**

La dureté totale de l'eau a été déterminée par volumétrie. Au laboratoire, 50 ml d'un échantillon d'eau ont été prélevés dans un Erlenmeyer ; on y a ajouté successivement 2 ml de cyanure de potassium (KCN) à 1%, 10 ml de tampon ammoniacal et une pincée de Noir Eriochrome T (NET). La solution est devenue rouge vin. L'addition de l'acide éthylène diamine tétra-acétique (EDTA) 0,02N comme titrant complexe la totalité des ions magnésium et calcium et la solution devient bleue, indiquant la fin du dosage. Les résultats sont obtenus avec la formule :

Dureté totale (mg.  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$ ) = (descente burette témoin- descente burette échantillon) x 20.

#### **II.2.2.1.1.9. Matières En Suspension (M.E.S.)**

Les teneurs en M.E.S. ont été déterminées de façon directe au spectrophotomètre de marque HACH DR/2400. Après introduction de 10 mL d'un échantillon d'eau dans une cellule spectrophotométrique en présence d'une solution témoin (eau distillée), la teneur de MES a été lue à la longueur d'onde  $\lambda = 810$  nm. Les valeurs sont rendues en mg.  $\text{L}^{-1}$ .

#### **II.2.2.1.1.10. Couleur**

La couleur a été obtenue par lecture directe au spectrophotomètre HACH DR/2400 à la longueur d'onde  $\lambda = 455$  nm et en présence d'un témoin constitué d'eau distillée. L'unité de mesure est le Platinum-Colbat (Pt-Co).

#### **II.2.2.1.1.11. Turbidité**

La turbidité a été déterminée par introduction de 25 mL d'un échantillon d'eau dans une cellule d'un turbidimètre de marque HACH 2100P ISO Turbidimeter. La lecture s'est faite directement au turbidimètre, et les valeurs obtenues sont exprimées en Nephelometric Turbidity Unit (NTU).

#### **II.2.2.1.1.12. Gaz carbonique dissous (CO<sub>2</sub>)**

Le CO<sub>2</sub> dissous est mesuré par la méthode volumique à l'aide de HACH Digital Titrator, Model 16900. 100 mL d'un échantillon d'eau ont été prélevés puis introduits dans un Erlenmeyer et 2 à 3 gouttes d'indicateur coloré, la phénolphthaléine y ont été ajoutées. La titration a été faite en utilisant la solution d'hydroxyde de sodium NaOH 0,3636N. Les résultats sont obtenus avec la formule : Quantité de CO<sub>2</sub> (mg. L<sup>-1</sup>) = nombre total de digits obtenu x 0,2 où 0,2 est le facteur de multiplication.

#### **II.2.2.1.1.13. Demande Biochimique en Dioxygène consommé en 5 jours (DBO<sub>5</sub>)**

Les valeurs de la DBO<sub>5</sub> ont été obtenues par respirométrie après incubation de 95 mL d'un échantillon d'eau dilué dans 165 ml d'eau de dilution dans une bouteille ambrée de 300 ml pendant cinq jours. L'appareil de mesure est un incubateur DBO mètre à 6 postes, Modèle BODtrak II ; la gamme de mesures est programmable de 0 à 700 mg/l DBO. Le tout est introduit dans une armoire thermorégulatrice (marque AQUA LYTIC) réglée à 20 ±1 °C (NF EN 25814 : 1992). Les valeurs sont exprimées en mg/L d'O<sub>2</sub>. Les résultats sont obtenus avec la formule :

Volume DBO<sub>5</sub> mg.L<sup>-1</sup> d'O<sub>2</sub> (mg.L<sup>-1</sup>) = DBO<sub>5</sub> mg.L<sup>-1</sup> d'O<sub>2</sub> lue (lecture à 5 jours) x facteur de dilution 2,11.

#### **II.2.2.1.1.14. Demande Chimique en Oxygène (DCO)**

La DCO est déterminée par la méthode dite de « Digestion au Réacteur » à l'aide d'un réacteur multiple à DCO. Ainsi 0,2 ml d'un échantillon issu des points de prélèvement et 2 ml du milieu fortement acide (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) en présence du bichromate de potassium (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) sont introduits dans des tubes à DCO puis chauffés à reflux, en présence d'un témoin à 150°C pendant deux heures dans un réacteur (appareil de chauffage multitube) de DCO. La valeur de la DCO (mg/L d'O<sub>2</sub>) de chaque échantillon est lue après refroidissement des tubes au spectrophotomètre de marque HACH DR/2400 à la longueur d'onde λ = 620 nm pour la gamme de 20 à 1500mg/L (Hach Company, 2003 et 2004).

#### **II.2.2.1.1.15. Détermination de la Matière Organique (MO)**

Selon la norme NTU 44-041 de juillet 1985, la matière organique se déduit du rapport  $MO = \frac{DCO}{DBO_5}$ . Ce qui permet d'apprécier la dégradabilité de la matière organique. Ce rapport est proche de 1,5 pour les eaux vannes, de 2 pour les eaux usées urbaines, et varie entre 3 et 5 pour les effluents issus des stations d'épuration. Ainsi donc, l'élévation du rapport indique un accroissement des matières organiques non biodégradables (Massang *et al.*, 2015).

#### **II.2.2.1.1.16. Formes d'azote**

Les concentrations des différentes formes d'azote ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  et  $\text{NO}_3^-$ ) ont été déterminées au spectrophotomètre de marque HACH DR/2400. La concentration en azote ammoniacal (exprimée en  $\text{mg.L}^{-1}$  de  $\text{NH}_4^+$ ) a été mesurée par la méthode de Nessler sur 25 ml d'échantillon d'eau brute et la lecture a été faite à la longueur d'onde  $\lambda = 425$  nm. Quant aux teneurs en nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ), nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) et orthophosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), elles ont été mesurées sur 10 ml d'échantillon avec comme réactifs le Nitriver III, le Nitriver V et le Phosver III respectivement. Les lectures ont été faites aux longueurs d'onde  $\lambda = 530$  nm,  $\lambda = 570$  nm et  $\lambda = 880$  nm respectivement et les résultats ont été exprimés respectivement en  $\text{mg.L}^{-1}$  de  $\text{NO}_2^-$ , de  $\text{NO}_3^-$  et de  $\text{PO}_4^{3-}$ .

#### **II.2.2.1.1.17. Sulfates**

La teneur des ions sulfates a été mesurée sur 10 ml d'échantillon avec comme réactif le SulfaVer 4. Ces ions sulfates réagissent avec le baryum du SulfaVer 4 pour former un précipité de sulfate de baryum. L'intensité de la turbidité est proportionnelle à la concentration en sulfates. Le SulfaVer 4 renferme également un agent stabilisant pour maintenir le précipité en suspension. La lecture a été faite au spectrophotomètre de marque HACH DR/2400 à la longueur d'onde  $\lambda = 580$  nm. Les résultats sont exprimés en  $\text{mg.L}^{-1}$   $\text{SO}_4^{2-}$ .

#### **II.2.2.1.1.18. Fer total**

La concentration de Fer total a été mesurée sur 10 ml d'un échantillon d'eau avec comme réactif le FerroVer. Ce réactif convertit tout le fer soluble et la majorité de ses formes insolubles dans les échantillons en fer ferreux. L'indicateur 1,10-phénanthroline dans le réactif du fer réagit avec le fer ferreux présent dans l'échantillon pour donner une coloration orange proportionnelle à la concentration du fer. La lecture a été faite au spectrophotomètre de marque HACH DR/2400, à la longueur d'onde  $\lambda = 510$  nm. Les résultats sont exprimés en  $\text{mg.L}^{-1}$  Fe.

#### **II.2.2.1.1.19. Fluor**

Le fluor ( $\text{F}^-$ ) se présente sous forme de fluorures dans le sol, l'air et l'eau (Degbey 2011). Ses sources principales de cet élément dans les eaux souterraines sont les roches sédimentaires, mais également les roches magmatiques. Les zones de thermalisme sont aussi concernées. Les concentrations en fluor sont plus faibles si la teneur en  $\text{Ca}^{2+}$ , issu du gypse par exemple, est forte. Le fluor est un élément essentiel pour la prévention des caries dentaires (dentifrices fluorés) ; cependant une ingestion régulière d'eau dont la concentration en fluor

est supérieure à 2 mg.l<sup>-1</sup> peut entraîner des problèmes de fluorose osseuse et dentaire. L'OMS (2011) recommande une valeur ≤ 1,5 mg.L<sup>-1</sup> de F<sup>-</sup> pour l'eau de boisson.

#### II.2.2.1.1.20. Indice de Pollution Organique (IPO)

L'Indice de Pollution Organique a été calculé pour rendre compte, de manière synthétique, du degré de pollution organique des eaux dans les différentes stations pendant la période d'étude. Cet IPO est calculé par la méthode de Leclercq & Maquet (1987) dont le principe est de répartir les valeurs des éléments polluants en 05 classes, de déterminer à partir de ces propres mesures le numéro de la classe correspondant pour chaque paramètre pour en faire la moyenne. Le calcul de cet indice est basé sur quatre paramètres (DBO<sub>5</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> et PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) résultant généralement des pollutions organiques. Pour chacun de ces paramètres, 5 classes de teneur ayant une signification écologique sont définies (Tableau VIII). L'IPO correspond à la moyenne des numéros des classes de chaque paramètre et les valeurs obtenues sont réparties en 5 niveaux de pollution (Tableau IX).

**Tableau VIII** : Classes de l'IPO en fonction des valeurs limites de chaque paramètre (Leclercq & Maquet ,1987)

Classes	Paramètres			
	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)
5	< 2	< 0,1	≤ 5	≤ 15
4	2-5.0	0,1 - 0,9	6-10.0	16 - 75
3	5,1-10	1 - 2,4	11-50.0	76 - 250
2	10,1 – 15	2,5 - 6	51 - 150	251 - 900
1	>15	> 6	> 150	> 900

**Tableau IX**: Classification des niveaux de pollution en fonction des classes de valeurs de l'IPO (Leclercq & Maquet ,1987)

Moyennes des classes	5,0 – 4,6	4,5 – 4,0	3,9 – 3,0	2,9 – 2,0	1,9 – 1,0
Niveau de pollution organique	Nul	Faible	Modéré	Fort	Très fort

#### II.2.2.1.1.21. Indice de Qualité des Eaux Souterraines (IQES)

L'indice de qualité de l'eau souterraine (IQES) basé sur plusieurs paramètres clés de la chimie des eaux souterraines a été calculé pour évaluer l'influence des activités naturelles et anthropiques. Avec cet indice, on peut obtenir un nombre qui exprime la qualité globale de l'eau (Khan *et al.*, 2005; Srinivas *et al.*, 2011). Pour déterminer le niveau de potabilité des eaux souterraines, l'indice de qualité de l'eau a été calculé à l'aide de la formule suivante de Kumar *et al.*(2009) ;

$$IQES = \frac{\sum_{i=1}^n q_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \mapsto \text{Où}$$

$W_i$  est un facteur de pondération calculé en utilisant l'équation

$$W_i = \frac{K}{S_i} \quad (1)$$

Où  $S_i$  est la valeur du paramètre de qualité de l'eau  $i$ , dans notre étude ce sont les normes de l'OMS (2011) relatives à la qualité de l'eau de consommation humaine.  $K$  est une constante de proportionnalité qui est 1,0 (Ravi *et al.*, 2006);  $n$  est le nombre total de paramètres de qualité de l'eau.

La détermination d'une échelle d'estimation de la qualité ( $q_i$ ) pour chaque paramètre s'obtient en divisant sa concentration dans chaque échantillon d'eau par une valeur guide pour les eaux de boisson puis à multiplier le résultat par 100. L'équation (2) est celle du calcul de  $q_i$  (Kumar *et al.*, 2009):

$$q_i = (C_i/S_i) \times 100 \quad (2)$$

Où  $-q_i$  désigne la qualité de l'eau estimée par rapport au paramètre  $i$  ;

$-C_i$  est la concentration en mg. L<sup>-1</sup> de chaque paramètre mesuré dans chaque échantillon d'eau ;

$-S_i$  est la valeur guide proposée pour les eaux de boisson.

La détermination de l'indice de qualité de l'eau (WQI) est effectuée à partir des équations (3) et (4) (Kumar *et al.*, 2009):

$$S_i = W_i \times q_i \quad (3)$$

$$WQI = \sum_{i=1}^n S_i \quad (4)$$

Où  $S_i$ , l'indice partiel (ou sous-indice), désigne l'indice de qualité pour un paramètre  $i$  donné.

L'IQES fournit un numéro unique qui exprime la qualité globale de l'eau à un certain endroit, en fonction de plusieurs paramètres de qualité de l'eau (Ravi *et al.*, 2006). La norme de l'OMS (2011) pour la qualité de l'eau potable a été utilisée pour calculer l'IQES. Les valeurs obtenues sont réparties en 5 classes de qualité (Tableau X).

**Tableau X:** Statut de la qualité de l'eau basée sur IQES (Kumar *et al.*, 2009)

Classe	Indice de qualité	Définition de la classe de qualité
01	0 -25	Excellente qualité
02	26 - 50	Bonne qualité
03	51 – 75	Qualité pauvre
04	76 - 100	Très pauvre qualité
05	> 100	Impropres à la consommation

#### **II.2.2.2. Analyses bactériologiques**

Elles ont été réalisées au laboratoire de bactériologie générale de l'Institut de Recherche en Elevage pour le Développement (IRED) de N'Djaména.

Les analyses bactériologiques qualitatives et quantitatives ont consisté à isoler, dénombrer et identifier des bactéries indicatrices de pollutions à savoir les Coliformes Totaux (CT), les Coliformes Fécaux (CF), *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* et *Salmonella* spp. (Sal) présents dans les différents échantillons. L'isolement et le dénombrement de la Flore Mésophile Aérobie Totale (FMAT) a également été effectué. Ces groupes bactériens ont été choisis en raison de leur importance dans les domaines d'hygiène et de santé publique comme indicateurs de la qualité microbiologique des eaux destinées à la consommation (Holt *et al.*, 2000 ; Rodier *et al.*, 2009).

##### **II.2.2.2.1. Méthodes d'isolement utilisées**

Deux méthodes ont été utilisées pour l'isolement des germes :

###### **✓ Méthode par inclusion**

La méthode par inclusion a servi à l'isolement et au dénombrement de la Flore Mésophile Aérobie Totale (FMAT) avec le milieu PCA (Plate Count Agar). Le milieu VRBL (Gélose Biliée Lactosée au cristal Vert et au Rouge neutre) a permis d'isoler les Coliformes Totaux (CT) et les Coliformes Fécaux (CF). Le milieu BP (Baird Parker) a été utilisé pour isoler l'espèce *Staphylococcus aureus* selon la norme NF V 08-057-1 (janvier 2004),

Après avoir marqué une boîte de Pétri vide, l'échantillon d'eau ouvert dans la zone de stérilité de la flamme du Bec-Bunsen a été homogénéisé pour chaque analyse. A partir d'une solution de dilution à  $10^{-3}$  a été faite et homogénéisé à l'aide d'un agitateur vortex (Toporix FB 15024). Ensuite, 1mL de la solution de dilution à  $10^{-3}$  a été prélevé à l'aide d'une micropipette munie d'un cône et déposé dans la boîte de Pétri ; le cône qui a été utilisé est jeté dans un bac contenant de l'eau de Javel. 15 ml de milieux spécifiques et sélectifs maintenus à 47°C ont été ajoutés et homogénéisés de façon à ce que l'échantillon se mélange à toute la gélose dans la boîte de Pétri. Une fois le milieu solidifié, les boîtes de Pétri ont été retournées

et incubées dans une étuve pendant 18 à 24h à 37°C. Les colonies ont été dénombré à l'aide d'un compteur de colonies. Le nombre d'unités formant colonies (UFC) a été multiplié par le facteur de dilution et exprimé en UFC/mL d'eau selon la formule suivante :

$$\text{Abondance d'UFC/mL} = \text{Nombre de colonies dénombrées sur la boîte de Pétri} \times 10^{+x}$$

#### ✓ Méthode par filtration sur membrane

L'utilisation des membranes filtrantes pour le contrôle de la qualité de l'eau reste la méthode standard (OMS, 1971 ; APHA 1998 et Rodier *et al.*, 2009). Elle consiste à recueillir, par filtration à travers une membrane en nitrate de cellulose de porosité 0,45 µm et de diamètre 47 mm, les bactéries de grande taille contenues dans un volume déterminé d'eau à analyser. La méthode par filtration sur membre a été utilisée pour l'isolement et le dénombrement de *Salmonella* spp., sur un milieu Hektoën selon la méthode de référence NF/EN ISO 6579, et de *Escherichia coli* sur milieu TBX (Tryptone Bile Glucuronate) selon la norme NF V08-053.

L'échantillon d'eau à analyser et la membrane filtrante ont été arrangés autour de la flamme du Bec Bunsen dans un rayon de stérilité de 15 cm. L'entonnoir, sa base et le fuité de la rame de filtration, et la pince qui va saisir la membrane, ont été passés à la flamme. 100 ml de l'échantillon d'eau ont été filtrés ; la membrane a été ensuite déposée sur un milieu de culture coulé en boîte de Pétri de 55 mm de diamètre. Après incubation à 37°C et 44°C pendant 18 à 24 heures, les colonies ont été identifiées et leur dénombrement a été fait à l'aide d'un compteur de colonies. Le nombre d'unités formant colonies (UFC) est exprimé en UFC/100 mL d'eau selon la formule suivante :

$$\text{Abondance d'UFC/ 100mL} = \frac{\text{Nombre de colonies dénombrées sur la boîte de Pétri}}{\text{volume d'eau analysée (ml)}} \times 100$$

#### II.2.2.2.2. Identification des germes isolés

En se basant sur les caractères cultureux (couleur, taille et forme), les colonies bactériennes susceptibles d'appartenir aux genres *Escherichia* et *Salmonella* ont été repiquées sur de la gélose Kligler-Hajna coulée en pente dans des tubes à essai et incubés à 37°C pendant 18 à 24 heures. Les cultures pures obtenues ont servi aux identifications biochimiques. Il s'agit d'un ensemble de réactions dont la somme des résultats équivaut au phénotype de la bactérie considérée. Ces tests sont regroupés en tests d'orientation servant au diagnostic de certitude de caractérisation d'*Escherichia coli* et de *Salmonella* spp.

#### **II.2.2.2.3. Détermination de *Salmonella* spp.**

Elle a nécessité 4 phases selon la méthode de référence **NF/EN ISO-6579, 2002E** à savoir : le pré-enrichissement, l'enrichissement, l'isolement et l'identification biochimique.

Lors de la phase de pré-enrichissement en milieu non sélectif, les prélèvements sortis du réfrigérateur ont été pré-enrichis au 1/10<sup>e</sup> avec de l'eau peptonée, homogénéisés à l'aide d'un vortex pendant 2 mn, laissés pour revivification à température ambiante pendant 30 mn puis incubés à 37°C pendant 18 à 24 heures. Pendant la phase d'enrichissement en milieux sélectifs liquides 0,1 mL du pré-enrichissement a été utilisé pour inoculer 10 ml du milieu Rappaport Vassiliadis Soja (RVS) (Réf : 7730A), incubé à 42°C. Par la suite, 1 mL du milieu d'enrichissement de RVS a été utilisé pour inoculer 10 mL du milieu Tétrathionate de Mueller-Kaufmann (MKTTn) (Réf : 9221A) ; la préparation a été incubée à 37 °C pendant 24 heures.

La phase d'isolement a consisté à ensemercer, par la technique de stries d'épuisement, la gélose Hektoen ((Réf : 51050) à partir des bouillons d'enrichissements. Les boîtes de Pétri ont ensuite été incubées à 37 °C pendant 24 heures. Au final, les colonies caractéristiques de couleur bleu-vert avec ou sans centre noir ont été sélectionnées pour leur identification biochimique.

#### **II.2.2.2.4. Détermination d'*Escherichia coli***

Les prélèvements sortis du réfrigérateur ont été pré-enrichis au 1/10<sup>e</sup> avec de l'eau peptonée tamponnée ; la préparation a été homogénéisée à l'aide d'un Vortex pendant 2 mn puis laissée pour la revivification à la température ambiante pendant 30 mn. Ensuite on est passé à l'ensemencement par inclusion dans la gélose TBX (Tryptone Bile Glucuronate) (NF V08-053) avec la solution pré-enrichie suivant la méthode de stries d'épuisement ; la préparation a été incubée à 37°C pendant 24 heures. Les colonies caractéristiques, de couleur bleue ont été sélectionnées pour leur identification biochimique construit dans le tableau XI ci-dessous.

**Tableau XI:** Identification d'*Escherichia coli* et de *Salmonella* spp. sur milieu Kligler-Hajna et Urée-Indole après 24 heures d'incubation à 37°C (IPP, 1978, Cattoir, 2012)

	Tests d'orientation	Milieu de culture	Température et durée d'incubation	Réactifs utilisés	Réaction observée
Identification d' <i>Escherichia coli</i>	Fermentation du glucose	Kligler-Hajna	37°C pendant 18 à 24 heures	-	Coloration jaune au fond du tube
	Production de gaz	Kligler-Hajna	37°C pendant 18 à 24 heures	-	Absence des bulles décollant la gélose de la paroi du tube
	Affinité pour l'oxygène	Kligler-Hajna	37°C pendant 18 à 24 heures	-	Culture sur la colonne du milieu
	Fermentation du lactose	Kligler-Hajna	37°C pendant 18 à 24 heures	-	Coloration rouge de la pente lactosée
	Production de H <sub>2</sub> S	Kligler-Hajna	37°C pendant 18 à 24 heures	-	Formation de gaz et la coloration en noir de la gélose
	Uréease +	Urée-indole	37°C pendant 18 à 24 heures	-	Coloration rouge violacée
	Indole -	Urée-indole	37°C pendant 18 à 24 heures	Réactif de James	Coloration Jaune
Identification de <i>Salmonella</i> spp.	Fermentation du glucose	Kligler-Hajna	37°C pendant 18 à 24 heures	-	Coloration jaune au fond du tube
	Production de gaz	Kligler-Hajna	37°C pendant 18 à 24 heures	-	Présence des bulles décollant la gélose de la paroi du tube
	Affinité pour l'oxygène	Kligler-Hajna	37°C pendant 18 à 24 heures	-	Culture sur la colonne du milieu
	Fermentation du lactose	Kligler-Hajna	37°C pendant 18 à 24 heures	-	Coloration jaune de la pente lactosée
	Production de H <sub>2</sub> S	Kligler-Hajna	37°C pendant 18 à 24 heures	-	Absence de coloration en noir de la gélose
	Uréease +	Urée-indole	37°C pendant 18 à 24 heures	-	Coloration Jaune
	Indole -	Urée-indole	37°C pendant 18 à 24 heures	Réactif de James	Coloration rouge

### II.2.2.2.5. Réalisation de l'antibiogramme

Les molécules d'antibiotiques utilisées en médecine humaine et en médecine vétérinaire ont servi dans l'évaluation de la sensibilité des bactéries. Elles ont été choisies sur la liste publiée par le Comité de l'Antibiogramme de la Société Française de Microbiologie (CA-SFM, 2020). Au total, 9 antibiotiques ont été retenus en fonction des habitudes de prescription des antibiotiques par le personnel de santé de la zone d'étude (Bodering, 2018) pour la réalisation de l'antibiogramme ; il s'est agi de  **$\beta$ -lactamines** (Pénicillines, Amoxicilline, Amoxicilline+ac.clavulanique, Amoxicilline sulbatans, Ampiciline); de **Céphalosporines** (Ceftriaxone); de **Cyclines** (Oxy-tétracycline); de **Aminosides** (Gentamicine, Tobramycine) et de **Macrolides** (Erythromycine). Les diamètres d'inhibition étaient comparés aux diamètres standards recommandés par le Comité de l'Antibiogramme de la Société Française de Microbiologie. En effet, pour évaluer la validité des disques d'antibiotiques et la conformité du milieu Muller Hinton (MH), les différents disques d'antibiotiques sélectionnés pour notre étude de sensibilité bactérienne ont subi un contrôle préalable de qualité avec des souches pures de *Salmonella* spp. et d'*Escherichia coli*.

Le principe est celui de la technique de diffusion des disques en milieu gélosé selon la méthode décrite par Bauer *et al.* (1966). La réalisation de l'antibiogramme a consisté à préparer l'inoculum bactérien, à l'ensemencer sur de la gélose, à appliquer les disques d'antibiotiques, à incuber les boîtes de Pétri, à lire et à interpréter les résultats.

#### ➤ Préparation de l'inoculum bactérien

À partir d'une culture de 24 heures obtenue sur de la gélose Müller-Hinton, deux à trois colonies bactériennes ont été prélevées et émulsionnées dans 10 mL d'eau saline NaCl 0,85% (BioMérieux, Marcy, France) pour l'obtention d'une turbidité de 0,5 à l'échelle de Mac-Farland équivalente à une concentration bactérienne d'environ 10<sup>6</sup> UFC/mL. La suspension ainsi obtenue a constitué l'inoculum bactérien.

#### ➤ Ensemencement, application des disques et incubation

Un écouvillon stérile est trempé dans l'inoculum bactérien puis frotté sur toute la surface de la gélose Müller-Hinton, en stries serrées en pivotant chaque fois la boîte de Pétri. Après cet ensemencement, deux disques d'antibiotiques éloignés au minimum de 30 mm de sorte à éviter des chevauchements des zones d'inhibition sont posés sur la surface de la gélose Müller-Hinton à l'aide d'un applicateur de disque. Les boîtes ont été ensuite laissées dans le rayon de sécurité de la flamme de Bec-Bunsen pendant environ 15 minutes afin de permettre

une pré-diffusion des antibiotiques. Les boîtes ensemencées ont été ensuite incubées à 37 °C pendant 24 heures.

### ➤ **Interprétation**

La mesure des diamètres d'inhibition est réalisée à l'aide d'une règle graduée. Les valeurs obtenues ont permis de classer les souches en trois catégories : Sensible (S), Intermédiaire (I) ou Résistant (R) conformément aux recommandations du Comité d'Antibiogramme de la Société Française de Microbiologie (CA-SFM, 2020).

## **II.2.2.3. Analyse de la stygofaune**

### **II.2.2.3.1. Tri et comptage**

Au laboratoire, les échantillons faunistiques ont été rincés au jet d'eau de robinet en utilisant un filet de 64 µm, puis déposés dans des boîtes de Pétri de 8 à 12 cm de diamètre pour les opérations de tri. Ce tri et le comptage des organismes ont été effectués à l'aide d'une loupe binoculaire de marques OPTIKA. Par la suite, les organismes de même taxa ont été regroupés dans des piluliers étiquetés au préalable, et conservés dans l'alcool à 96° pour les travaux futurs.

### **II.2.2.3.2. Identification morphologique**

Des traits morphologiques de ressemblance et ou de divergences ont été pris en considération entre les organismes récoltés et ceux représentés dans des ouvrages, des publications et des clés d'identifications de Merritt *et al.* (2008) et de Tachet *et al.* (2010). La dissection de certains organismes a parfois été possible. C'est par exemple le cas des spécimens du genre *Metastenasellus* (Isopode) dont le pléopode 2 du mâle a été disséqué puis comparé à ceux rendus dans les publications. Les identifications taxinomiques ont été faites à l'aide des clés d'identifications et des publications de Durand & Levêque (1980), Argano (1994), Merritt *et al.* (2008), Tachet *et al.* (2010) et Zébazé Togouet *et al.* (2013).

### **II.2.2.3.3. Mensurations et dissections de *Metastenasellus* sp. (Isopode)**

Les spécimens *Metastenasellus* sp. des deux sexes ont été disséqués pour permettre de mieux apprécier les différences entre taxa (Boutin, 1993). Cependant, avant toute dissection, ces spécimens ont été plongés dans un mélange de 50% d'éthanol + 50% de glycérine contenu dans un verre de montre. La préparation a été laissée à l'air libre (un à deux jours) pour permettre à l'éthanol de s'évaporer (Coineau *et al.*, 1994). Au terme de cette opération, les spécimens ont été placés en décubitus dorsal dans une salière contenant de la glycérine pure et ont été disséqués sous une loupe binoculaire de marque OPTIKA à l'aide des minuties. La dissection a été effectuée, des antennules à l'uropode, par section d'une paire d'appendices

l'une après l'autre dans l'ordre du recouvrement naturel (Henry & Magniez, 1983). Ces appendices ont été montés entre lame et lamelle dans de la glycérine gélatineuse. Les lames ont été lutées à l'aide du baume de Canada placé aux quatre coins de la lamelle puis rangées à plat dans des boîtes porte-lames. Les lames ainsi lutées ont servi à réaliser les dessins à la chambre claire du microscope Olympus BX 51; ces derniers ont été traités via le logiciel Photoshop CS version 7.0. Des images en photos ont été réalisées à l'aide d'un microscope OPTIKA au grossissement x100 relié à un ipad acer iconia pour compléter les informations sur les organismes.

### **II.2.3. Analyses statistiques des données**

#### **II.2.3.1. Traitement des données physicochimiques**

L'analyse globale des données sur la qualité physicochimique des eaux de puits étudiés, obtenues sur le terrain et en laboratoire a consisté au calcul des moyennes et des corrélations entre différents facteurs, et à l'analyse des tendances. Les histogrammes de distribution de valeurs et les boîtes à moustaches (box plot) ont été tracés grâce au logiciel GraphPad Prism version 8.0. et ont permis de représenter les mesures observées à l'échelle saisonnière. Ces traitements ont été effectués à l'aide du tableur Microsoft-Excel 2016. La comparaison des moyennes et l'étude de la variabilité spatiale et spatio-temporelle d'un site à un autre ont été réalisées à l'aide du test One Way ANOVA et Two Way ANOVA. La corrélation de Pearson entre les variables morphohydrologiques, physicochimiques et bactériologiques mesurés ont été calculées à l'aide Des logiciels SPSS version 20.0 et GraphPad Prism version 8.0.

#### **II.2.3.2. Traitement des données biologiques**

##### **II.2.3.2.1. Analyses uni variées**

La richesse taxonomique, l'indice de diversité de Shannon et Weaver et l'équitabilité ont été calculés, les abondances bactériennes ont été déterminées, la liste faunistique de chaque site a été établi afin d'étudier l'effet saison.

##### **II.2.3.2.2. Indice de diversité H' de Shannon et Weaver (1949)**

L'indice de diversité H' a permis d'estimer la diversité spécifique des communautés des puits étudiés. Il permet d'avoir rapidement, en un seul chiffre, une évaluation de la biodiversité du peuplement. Il tient compte de la taille de l'échantillon et des abondances relatives des taxa considérés. Il se calcule par la formule suivante :

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

Où :

ni 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 ;

$H'$  est un minimal ( $H'_{\min} = 0$ ) si tous les individus de l'échantillon appartiennent à un seul et même taxon ou si dans un peuplement chaque taxon est représenté par un seul individu, excepté un autre taxon rassemble tous les autres individus du peuplement.  $H'$  est un maximal ( $H'_{\max} = \log_2 S$ ) quand les individus sont répartis d'une façon égale entre les taxa (Fontier *et al.*, 2001).

#### **II.2.3.2.3. Indice ( $J'$ ) de Piélou**

L'indice  $J'$  de Piélou permet d'étudier la régularité de la distribution des espèces. Cet indice varie entre 0 et 1 et traduit la qualité d'organisation d'un peuplement (Dajoz, 2000). Il est proche de 1 quand toutes les espèces tendent à avoir une même abondance et proche de 0 quand une ou quelques espèces dominent le peuplement. Il se calcule selon l'équation ci-dessous où  $H'$  est l'indice de diversité de Shannon et Weaver et  $S$  le nombre d'espèces.

$$J' = \frac{H'}{\log_2 S}.$$

#### **II.2.3.2.4. Analyse en Composante Principale (ACP)**

L'Analyse en Composante Principale (ACP) consiste à rechercher des correspondances ou corrélations entre des éléments d'une matrice de données. L'ACP permet de décrire de façon simplifiée des tableaux de données quantitatives du type ( $n$  observations  $\times$   $p$  variables). L'ACP permet de découvrir des structures existantes avant de chercher des hypothèses explicatives (Fontier *et al.*, 2001). Dans notre cas, les observations sont les stations, et les variables sont les taxa ou les valeurs moyennes des descripteurs physico-chimiques de l'eau. Les données de la matrice ont subi une transformation logarithmique ou double racine carré afin de stabiliser les variances en donnant ainsi de l'importance aux espèces rares. La distance utilisée est celle du Chi2.

#### **II.2.3.2.5. Classification Ascendance Hiérarchique (CAH)**

Afin de compléter l'interprétation de l'ACP, une classification des stations d'étude a été réalisée. Cette méthode de classification CAH est destinée à produire des groupements décrits par un certain nombre de variables ou caractères (Lebart *et al.*, 1982). Elle procède à la construction des classes (paquets) par agglomération successive des objets deux à deux, qui fournissent une hiérarchie de partition des objets. Il existe plusieurs méthodes de CAH et plusieurs choix du calcul de distances entre deux objets, deux classes ou un objet et une classe (Benzecri, 1973). C'est l'indice de Bray-Curtis qui a été retenu, avec la technique de regroupement agglomératif moyen tel que recommandé par Legendre (1984).

A decorative border resembling a scroll, with a black outline and rounded ends, framing the chapter title.

# **CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSION**

## **III.1. RESULTATS**

### **III.1.1. Caractéristiques morphométriques des puits étudiés**

Les coordonnées GPS et caractéristiques morphométriques et hydrologiques des différents paramètres descriptifs des stations étudiées sont regroupés dans le tableau XII. Dans l'ensemble, le mode de construction des puits échantillonnés est différent d'un puits à l'autre et d'une localité à l'autre. Nous avons recensé 36 puits avec margelle bétonnée, 10 puits avec margelle bétonnée et roue, 03 puits avec margelle en roue, et 1 puits avec margelle en bois. La hauteur de ces différentes margelles a aussi varié de 0,1 à 1m ; moyenne 0,63. Les margelles les plus hautes ont été celles en béton (1m). Parmi les cinquante puits échantillonnés, quarante-quatre (44) soit 88% ont été constamment ouverts et six (06) soit 12% restants ont été fermés, La profondeur des puits a varié de 3,14 à 17,79 m pour une moyenne de 4,93. Le plus grand diamètre de puits a été de 1,70m. Ces analyses morphométriques ont montré que 86% des puits n'ont pas de couvercle, 75,5% des puits ont des margelles supérieures à 0,5 m mais la majorité de ces margelles sont en état de dégradation avancée et 52% de puits sont situés à moins de 15 m des latrines. Les puits des 1<sup>er</sup> et 3<sup>e</sup> arrondissements ont été les mieux entretenus et dans leur majorité étaient distants des latrines (d'au minimum 15 m). Ceux des 2<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements ont été, à plus de 50%, situés à moins de 15 m des latrines. Ce faible niveau de protection marqué par l'absence de couvercle sur la majorité des puits les expose à tous types de pollution (Tableau XIII). En raison de la faiblesse du système d'adduction en eau potable dans la ville, tous les puits sont utilisés pour les usages quotidiens (se laver, laver les ustensiles de cuisine, préparer le repas, jardinage...).

**Tableau XII:** Coordonnées GPS et caractéristiques morphométriques et hydrologiques des différentes stations étudiées.

Localités	Quartiers	Code Stations	Ouv./Fermé	Tmarg	Coordonnées GPS	Alt. (m)	N.P (m)	C.E (m)	Prof. (m)	Dtre (m)	H.Marg (m)	D.Lat (m)	Utilisation	Entretien	
1er arrondissement	Dokab	P5	ouvert	beton	08°57'06,5" / 16°04'09,5"	403	2,85	3,54	6,40	0,55	0,40	16,60	se laver, laver les ustensiles de cuisine, préparer le repas, jardinage	Médiocre	
		P6	fermé		08°57'01,9" / 16°03'81,9"	400	7,28	10,51	17,79	1,17	0,68	16,10		Passable	
		P7	ouvert		08°56'17,8" / 16°04'43,5"	412	1,35	1,79	3,14	0,55	0,50	11,00		Médiocre	
		P8			08°56'25,5" / 16°04'93,4"	394	0,83	3,46	4,29	0,76	0,60	14,75		Passable	
	Doyon	P9	ouvert	Absent + roue	08°55'36,5" / 16°05'62,1"	399	6,54	2,52	9,06	1,28	0,57	6,35		Médiocre	
		P10		beton + roue	08°55'12,6" / 16°05'94,3"	395	6,97	5,19	12,16	1,20	0,50	15,10		Bien	
2e arrondissement	Dombao	P14	fermé	beton	08°56'02,0" / 16°07'56,6"	396	5,87	4,15	10,02	1,60	0,48	14,40		Médiocre	
		P15			08°56'66,9" / 16°07'62,9"	395	5,49	4,62	10,10	1,40	0,84	11,60		Passable	
	Mbombaya	P16		08°57'16,9" / 16°07'61,4"	401	2,75	4,33	7,08	1,10	0,48	13,70				
	Mbomian	P46		08°57'01,7" / 16°09'34,7"	401	2,20	6,49	8,68	1,00	1,00	6,10				
	Guelbé	P47		beton + roue	08°56'99,4" / 16°09'54,6"	400	3,87	3,73	7,59	1,26	0,67	13,62			
	Mbomian	P48		08°56'83,0" / 16°09'19,3"	401	1,36	6,28	7,64	1,00	0,68	6,30				
	Haoussa	P49		Absent et roue	08°56'75,5" / 16°09'02,9"	398	4,79	5,60	10,38	0,93	0,62	13,10			
	Baguirmi	P50		08°56'58,1" / 16°08'80,4"	401	2,37	6,54	8,91	0,90	0,66	17,60				
3e arrondissement	Doumbeur 1	P24	ouvert	beton	08°59'25,4" / 16°07'94,3"	406	6,80	3,58	10,37	0,62	0,75	7,00	Médiocre		
		P25		beton + roue	08°59'25,4" / 16°08'00,3"	396	4,38	2,92	7,29	0,90	0,50	0,00	Passable		
		P26		beton	08°59'15,1" / 16°08'01,9"	395	1,86	3,97	5,82	0,63	0,57	23,00	Médiocre		
		P27		beton + roue	08°59'22,9" / 16°08'20,1"	403	3,14	6,03	9,17	1,26	0,60	16,80	Bien		
		P28		beton	08°59'28,8" / 16°08'53,7"	396	6,60	3,04	9,64	1,64	0,10	12,10	Passable		
		P29			08°59'17,1" / 16°08'63,2"	400	7,17	5,63	12,80	0,74	0,63	23,00	Médiocre		
		P30			08°59'12,8" / 16°08'57,1"	419	2,40	2,03	4,43	0,75	0,53	45,00	Passable		
	Lac-Taba	P31	fermé	beton + roue	08°59'33,8" / 16°08'93,3"	402	2,23	2,79	5,01	0,74	0,88	12,60	Médiocre		
		P32		08°59'18,0" / 16°09'16,2"	405	0,87	2,68	3,54	1,14	0,63	10,20				
	Guelkoura	P40	fermé	beton	08°57'75,1" / 16°08'63,8"	395	2,83	7,28	10,11	1,60	0,80	6,10	Bien		
		P41			08°57'74,8" / 16°08'96,1"	405	5,83	7,54	13,37	1,16	0,50	13,85	Médiocre		
	15 Ans 1	P42	fermé	beton + roue	08°57'79,3" / 16°08'91,1"	401	5,74	8,55	14,29	0,94	0,78	7,00	Médiocre		
	15 Ans 2	P43		beton	08°57'88,9" / 16°09'05,4"	397	4,49	5,07	9,56	0,92	0,55	10,70	Passable		
		P44	Absent et bois	08°58'22,6" / 16°09'02,7"	405	7,77	2,18	9,95	1,30	0,70	36,45	Bien			
		P45	08°58'19,9" / 16°09'43,9"	404	4,11	5,00	9,11	1,50	0,79	13,72	Médiocre				
4e arrondissement	Guelkol 1	P1	ouvert	beton	08°57'76,3" / 16°06'04,3"	401	2,71	4,83	7,54	0,66	0,48	19,80	Médiocre		
		P2			08°58'14,0" / 16°05'49,9"	405	3,01	3,81	6,82	0,55	0,60	16,60	Bien		
		P3			08°58'87,5" / 16°04'42,4"	396	3,24	3,99	7,23	0,90	0,53	14,63			
	Guelkol 2	P4		08°57'56,6" / 16°04'77,4"	405	1,68	4,94	6,62	1,70	0,45	17,45	Passable			
		Djarabé 1		P11	08°55'68,1" / 16°05'97,0"	393	6,15	4,44	10,59	1,20	0,62		19,99		
	P12			beton + roue	08°55'91,5" / 16°06'02,7"	393	5,44	3,79	9,23	1,20	0,62		19,99		
	Djarabé 2	P13		beton	08°56'27,0" / 16°06'10,8"	395	6,82	3,22	10,04	0,94	0,47	9,40	Médiocre		
		P17			08°57'59,2" / 16°06'92,2"	397	5,71	5,48	11,18	1,12	0,70	23,10	Passable		
		P18			08°57'58,0" / 16°06'81,9"	390	4,21	4,04	8,25	1,20	0,85	10,10			
	Doumbeur 2	P19		beton	08°58'08,9" / 16°06'82,1"	388	4,98	6,96	11,94	1,21	0,72	10,00	Bien		
		P20			08°58'07,9" / 16°06'88,3"	392	4,28	4,34	8,62	1,18	0,64	16,00			
		P21			beton + roue	08°58'13,1" / 16°06'90,7"	397	4,72	4,96	9,67	0,30	0,90	24,00	Passable	
		P22			beton	08°58'41,0" / 16°07'37,4"	391	3,85	4,08	7,94	1,00	0,70	17,70		
		P23				08°58'92,2" / 16°07'90,6"	398	2,18	2,08	4,26	0,92	0,40	25,90		
	Guelkol 2	P33		fermé	beton	08°57'60,4" / 16°06'00,9"	401	3,31	6,17	9,48	1,40	0,95	10,10	Très bien	
	Gueldjem 1	P34		ouvert	beton + roue	08°57'71,3" / 16°07'58,4"	408	4,33	8,42	12,75	1,12	0,45	18,40	Passable	
		P35				08°57'60,2" / 16°08'21,6"	403	7,17	7,66	14,83	0,10	0,55	12,50	Médiocre	
		P36			beton	08°57'76,8" / 16°08'19,1"	400	3,14	4,69	7,82	1,30	0,78	0,90	Passable	
P37		08°57'80,6" / 16°08'38,0"	400			1,42	5,25	6,67	1,15	0,57	11,45	Médiocre			
Gueldjem 2	P38	fermé	beton	08°57'58,6" / 16°08'42,1"	405	2,54	5,71	8,25	0,76	0,68	10,60	Passable			
	P39			08°57'26,7" / 16°08'22,4"	396	5,58	7,99	13,57	1,30	0,82	7,50	Bien			
						<b>Minimum</b>	<b>388</b>	<b>0,83</b>	<b>1,79</b>	<b>3,14</b>	<b>0,10</b>	<b>0,10</b>			
						<b>Maximum</b>	<b>419</b>	<b>7,77</b>	<b>10,51</b>	<b>17,79</b>	<b>1,70</b>	<b>1,00</b>	<b>45,00</b>		
						<b>Moyenne</b>	<b>400</b>	<b>4,15</b>	<b>4,93</b>	<b>9,07</b>	<b>1,03</b>	<b>0,63</b>	<b>14,90</b>		

NP (m)= niveau piézométrique, CE (m)= épaisseur de la colonne d'eau, Dtre (m)= diamètre du puits, Dlat (m)= distance du puits par rapport aux latrines, Prof (m) = profondeur du puits, Hmarg (m)=hauteur de la margelle, Alt (m)= altitude

### III.1.2. Caractéristiques physicochimiques des eaux souterraines

Dans l'ensemble, le profil de qualité de l'eau a varié d'une station à une autre et d'une localité à une autre.

#### III.1.2.1. Variations spatiales des variables physicochimiques des eaux souterraines dans l'ensemble des sites

La température moyenne des eaux était de 28,74°C (28,43°C - 29,21°C) et le pH moyen 6,76 (Annexe 1). Ce qui montre que ces eaux sont faiblement acides.

Les eaux sont restées turbides, c'est à dire avec des teneurs supérieures à 5 FTU dans tous les arrondissements de la Ville de Moundou (Tableau XIV).

**Tableau XIII:** Valeurs moyennes et intervalles de confiance des différents paramètres physicochimiques mesurés dans les quatre arrondissements de Moundou au cours de l'étude

Paramètres	Arrondissements				Test de One-way ANOVA
	I	II	III	IV	
Température (°C)	28,76 ± 0,007	29,21 ± 0,012	28,43 ± 0,008	28,56 ± 0,007	F= 4,738 p= 0,004**
pH (UC)	6,71 ± 0,013	6,81 ± 0,008	6,66 ± 0,006	6,86 ± 0,006	F= 0,84 p= 0,47
Alcalinité (mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub> )	37,00 ± 0,19	40,25 ± 0,16	30,70 ± 0,11	41,90 ± 0,52	F= 0,71 p= 0,54
MES (mg.L <sup>-1</sup> )	37,83 ± 0,44	25,41 ± 0,36	41,18 ± 0,84	34,10 ± 0,34	F= 0,32 p= 0,80
Turbidité (FTU)	15,25 ± 3,40	8,00 ± 0,16	17,49 ± 0,21	15,21 ± 0,21	F= 0,98 p= 0,40
Couleur (Pt-Co)	83,96 ± 2,38	29,08 ± 0,71	129,83 ± 3,03	99,05 ± 1,57	F= 1,29 p= 0,27
Conductivité électrique (µS/Cm)	820,20 ± 78,36	2230,20 ± 25,57	824,95 ± 8,67	1195,7 ± 12,08	F= 7,66 p= 0,0001***
TDS (mg.L <sup>-1</sup> )	401,23 ± 7,83	1109,30 ± 12,72	422,27 ± 4,26	599,95 ± 6,08	F= 3,55 p= 0,01*
Dureté totale (mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub> )	744,33 ± 13,55	2404,70 ± 17,67	1369,10 ± 12,14	1469,6 ± 13,24	F= 7,34 p= 0,18***
O <sub>2</sub> saturatin (%)	65,50 ± 22,36	55,50 ± 17,24	59,57 ± 18,61	57,02 ± 16,78	F= 0,86 p= 0,46
CO <sub>2</sub> dissus (mg.L <sup>-1</sup> )	27,98 ± 0,21	50,99 ± 0,37	48,61 ± 0,24	35,72 ± 0,13	F= 10,10 p= <0,0001****
DBO <sub>5</sub> (mg.L <sup>-1</sup> O <sub>2</sub> )	196,58 ± 1,16	145,99 ± 0,96	129,59 ± 0,33	156,24 ± 0,50	F= 10,90 p= <0,0001****
DCO (mg.L <sup>-1</sup> O <sub>2</sub> )	592,67 ± 6,63	615,88 ± 3,70	540,63 ± 3,73	464,45 ± 3,15	F= 1,38 p= 0,25

Matière organique (mg.L <sup>-1</sup> )	2,71 ± 0,03	4,53 ± 0,04	3,85 ± 0,03	2,77 ± 0,02	F= 3,55 p= 0,017*
Nitrites (mg.L <sup>-1</sup> NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	5,72 ± 0,16	21,42 ± 0,77	48,48 ± 1,96	46,59 ± 1,40	F= 0,64 p= 0,59
Nitrates (mg.L <sup>-1</sup> NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	0,38 ± 0,005	9,21 ± 0,46	4,26 ± 0,27	0,58 ± 0,006	F= 2,47 p= 0,06
Amomnium (mg.L <sup>-1</sup> NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	0,05 ± 0,002	0,13 ± 0,004	0,20 ± 0,004	0,16 ± 0,003	F= 1,07 p= 0,36
Orthphosphates (mg.L <sup>-1</sup> PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	55,35 ± 1,22	77,00 ± 1,06	61,94 ± 0,80	54,86 ± 0,50	F= 1,52 p= 0,21
Sulfates (mg.L <sup>-1</sup> SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	14,92 ± 0,52	73,09 ± 0,64	22,38 ± 0,25	24,27 ± 0,22	F= 22,15 p= <0,0001****
Fluor (mg.L <sup>-1</sup> F)	0,13 ± 0,003	0,05 ± 0,001	0,19 ± 0,003	0,18 ± 0,002	F= 2,65 p= 0,052
Fer (mg.L <sup>-1</sup> )	0,59 ± 0,007	0,95 ± 0,004	0,56 ± 0,005	0,62 ± 0,003	F= 1,58 p= 0,19
Bicarbonates (mg.L <sup>-1</sup> HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	70,21 ± 0,39	92,34 ± 1,05	92,68 ± 0,67	76,01 ± 0,46	F= 3,61 p= 0,01*

F= test de One-way ANOVA; p = p-value; (\*) = différence significative à p < 0, 05

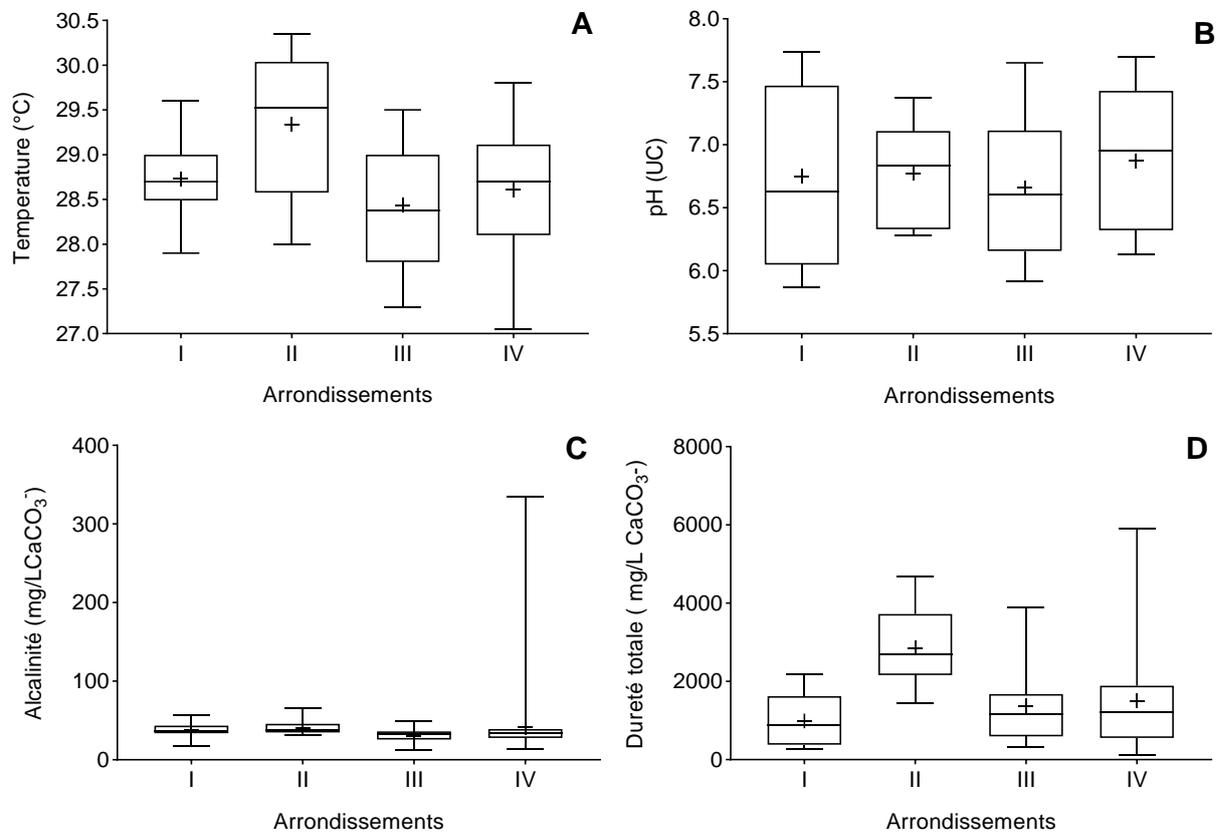
Entre les quatre arrondissements le tableau l'annexe 2 montre que la température moyenne des eaux a été de 28,77°C (27,20 °C - 30,35°C) ; ces variations indiquent que les eaux des puits du 2<sup>e</sup> arrondissement, situé dans la zone industrielle (MCT et Brasseries du Tchad), étaient plus chaudes (Fig.8A). Elles présentent des profils de variation irréguliers et relativement similaires dans les différentes stations (Figure 8A). Les oscillations de la température sont différent significativement d'un arrondissement à l'autre (p < 0,05) (Tableau XIV).

D'après la figure 8B, la valeur moyenne du pH des eaux a été de 6,77 (5,87 - 7,74) ; ces variations montrent que les eaux des puits des 2<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements ont été les moins acides avec des valeurs relativement plus élevées de pH comparées à celles des autres localités. Les variations des valeurs obtenues de pH dans les quatre arrondissements ne sont pas significatives (p > 0,05) (Tableau XIV).

La teneur moyenne en ions alcalins 37,69 mg.L<sup>-1</sup>CaCO<sub>3</sub> (12 mg.L<sup>-1</sup>CaCO<sub>3</sub> - 373 mg.L<sup>-1</sup> CaCO<sub>3</sub>) a été relativement faible dans l'ensemble des puits, à l'exception des celles des puits du quatrième arrondissement qui a présenté une valeur plus élevée (Fig.8C). Les variations des valeurs de l'alcalinité des eaux obtenues dans les quatre arrondissements ne montrent aucune différence significative (p > 0,05) entre les différents arrondissements (Tableau XIV).

La valeur moyenne de la dureté totale des eaux des puits analysées a été de 1502 mg.L<sup>-1</sup> (130 mg.L<sup>-1</sup> - 5900 mg.L<sup>-1</sup>). D'une manière générale, ces eaux souterraines présentent une forte

dureté (Fig.8D) avec une différence très significative ( $p < 0,05$ ) entre les localités (Tableau XIV).



**Figure 8:** Box plots présentant la variation spatiale des valeurs de température (A), de pH (B), de l'Alcalinité (C) et de la Dureté totale (D) des quatre arrondissements de la ville de Moundou au cours de l'étude. I, II, III et IV= arrondissements

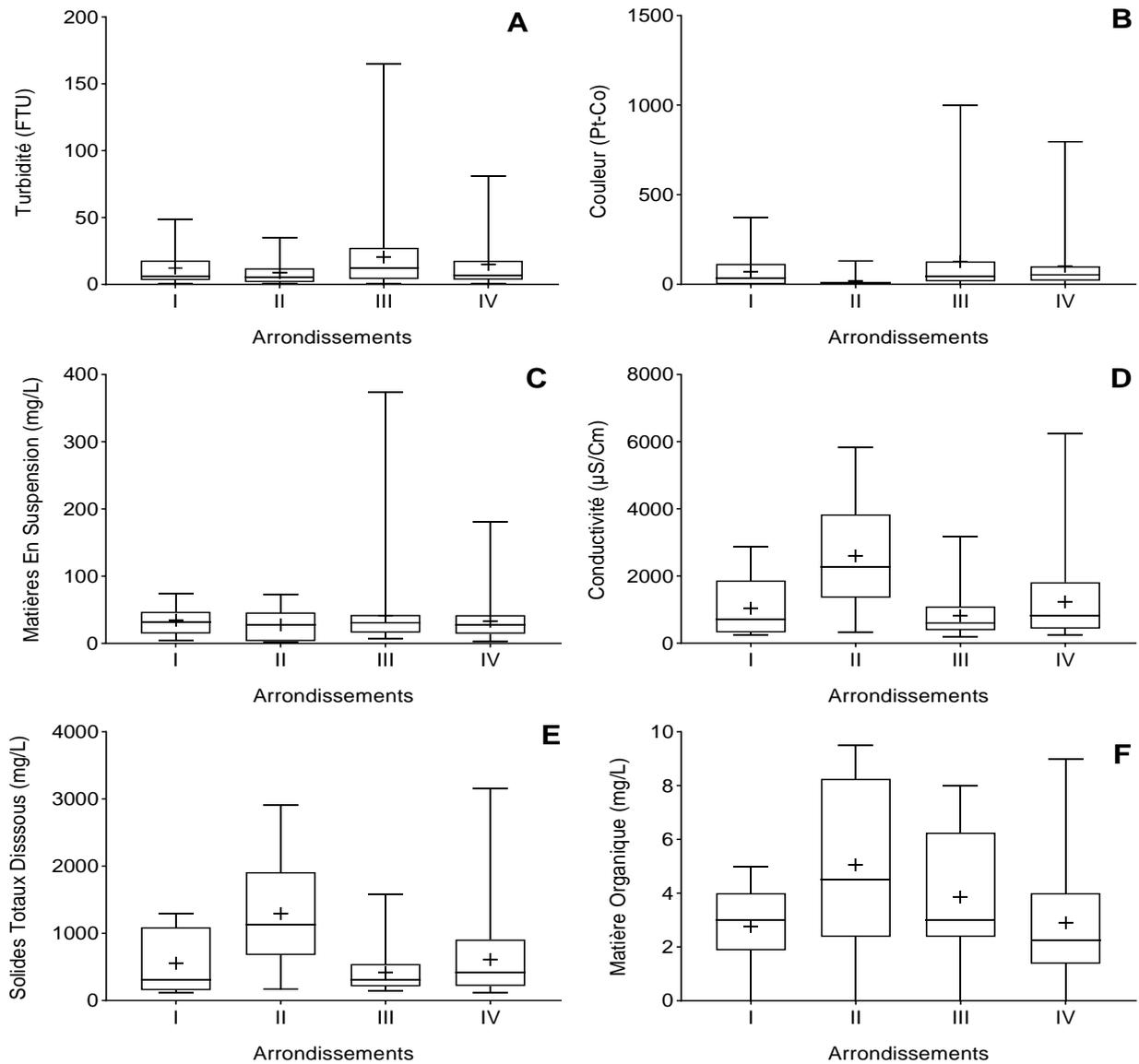
La valeur moyenne de la turbidité a été de 13,92 FTU (0,7 FTU - 80,80 FTU) ; cette oscillation de la turbidité a montré que la turbidité a été relativement élevée dans les eaux des puits des 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements (Figure 9A). Les plus faibles valeurs de la turbidité ont été enregistrées dans les 1<sup>er</sup> et 2<sup>e</sup> arrondissements. La turbidité n'a montré aucune différence significative ( $p > 0,05$ ) entre les différents arrondissements (Tableau XIV).

Les valeurs de la couleur des eaux des puits ont oscillé autour d'une moyenne de 95,27 Pt-Co (0 Pt-Co - 1000 Pt-Co) ; les valeurs relativement plus élevées de la couleur ont été enregistrées dans les 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements. Par contre dans les deux autres arrondissements, elles ont été très faibles (Fig.9A). La couleur n'a montré aucune différence significative ( $p > 0,05$ ) entre les différents arrondissements (Tableau XIV).

La concentration moyenne en MES a été de 35,28 mg/L (2 mg/L - 373 mg/L). Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées dans les troisièmes et quatrièmes arrondissements. Les valeurs faibles ont été enregistrées durant toutes les périodes d'étude dans toute la Ville de Moundou (Fig.9C). Cette variation des MES ne présente pas également une différence significative ( $p > 0,05$ ) entre les différents arrondissements (Tableau XIV).

La valeur moyenne de la conductivité dans les eaux des puits a été de 1204,9  $\mu\text{S}/\text{Cm}$  (187  $\mu\text{S}/\text{Cm}$  - 6230  $\mu\text{S}/\text{Cm}$ ). Les eaux du 2<sup>e</sup> arrondissement restent celles les plus minéralisées. Ce profil est superposable à celui des TDS (Fig.9E). Une différence significative ( $p < 0,05$ ) a été notée entre les arrondissements (Tableau XIV).

La teneur moyenne en matières organiques a été de 3,37  $\text{mg.L}^{-1}$  (0 - 9,50  $\text{mg.L}^{-1}$ ) ; cette valeur moyenne montre que les eaux des puits de la ville de Moundou sont enrichies en matières organiques (Figure 9F). Une différence significative ( $p < 0,05$ ) a été notée entre les arrondissements (Tableau XIV).



**Figure 9:** Box plots présentant la variation spatiale des valeurs de Turbidité (A), de Couleur (B), des MES (C) et en Conductivité électrique (D), des TDS (E) et des Matières organiques (F) des quatre arrondissements de la ville de Moundou au cours de l'étude. I, II, III et IV= arrondissements

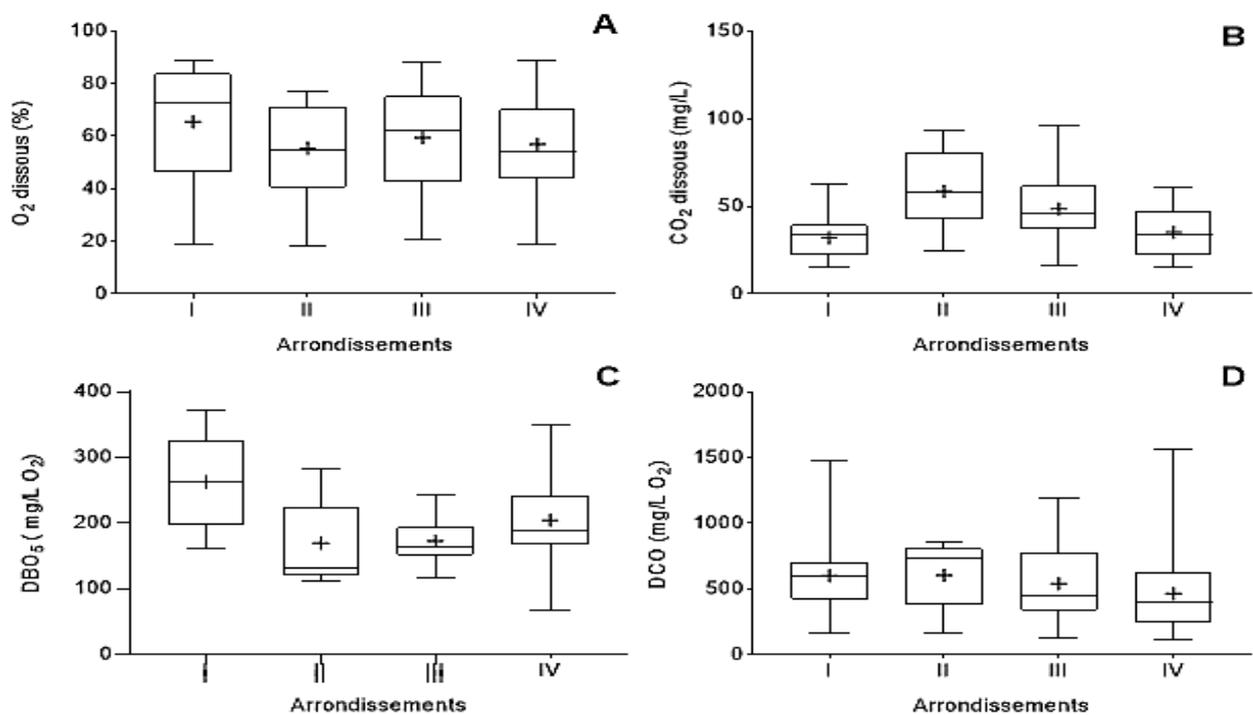
La valeur moyenne du pourcentage de saturation de l'eau en oxygène dissous a été de 58% (18% - 89%). Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées dans les 1<sup>er</sup>, 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements (Fig.10A). Aucune différence significative ( $p > 0,05$ ) n'a été notée entre les différents arrondissements (Tableau XIV).

La concentration moyenne en  $\text{CO}_2$  dissous dans l'ensemble des eaux échantillonnées a été de  $41,10 \text{ mg.L}^{-1}$  ( $15 \text{ mg.L}^{-1} - 96,20 \text{ mg.L}^{-1}$ ). Cependant, on observe une légère augmentation des valeurs du  $\text{CO}_2$  dans le deuxième et les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> arrondissements de la ville de

Moundou (Fig.10B). On a enregistré une différence significative ( $p < 0,05$ ) des valeurs moyennes de  $\text{CO}_2$  dissous des quatre arrondissements (Tableau XIV).

Les résultats de la  $\text{DBO}_5$  ont montré une valeur moyenne de  $151,45 \text{ mg.L}^{-1} \text{ O}_2$  ( $50,54 \text{ mg.L}^{-1} \text{ O}_2 - 278,52 \text{ mg.L}^{-1} \text{ O}_2$ ) (Fig.10C). Une différence significative ( $p < 0,05$ ) a été notée entre les arrondissements (Tableau XIV).

La valeur moyenne de la DCO a été de  $526,92 \text{ mg.L}^{-1} \text{ O}_2$  ( $110 \text{ mg.L}^{-1} \text{ O}_2 - 1536 \text{ mg.L}^{-1} \text{ O}_2$ ); les valeurs élevées ont été enregistrées dans les 1<sup>er</sup>, 2<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements (Fig.10D). Aucune différence significative ( $p > 0,05$ ) n'a été notée entre les différents arrondissements (Tableau XIV).



**Figure 10:** Box plots présentant la variation spatiale des valeurs d' $\text{O}_2$  dissous (A), de  $\text{CO}_2$  dissous (B), de  $\text{DBO}_5$  (C) et de DCO (D) des quatre arrondissements de la ville de Moundou au cours de l'étude. I, II, III et IV= arrondissements

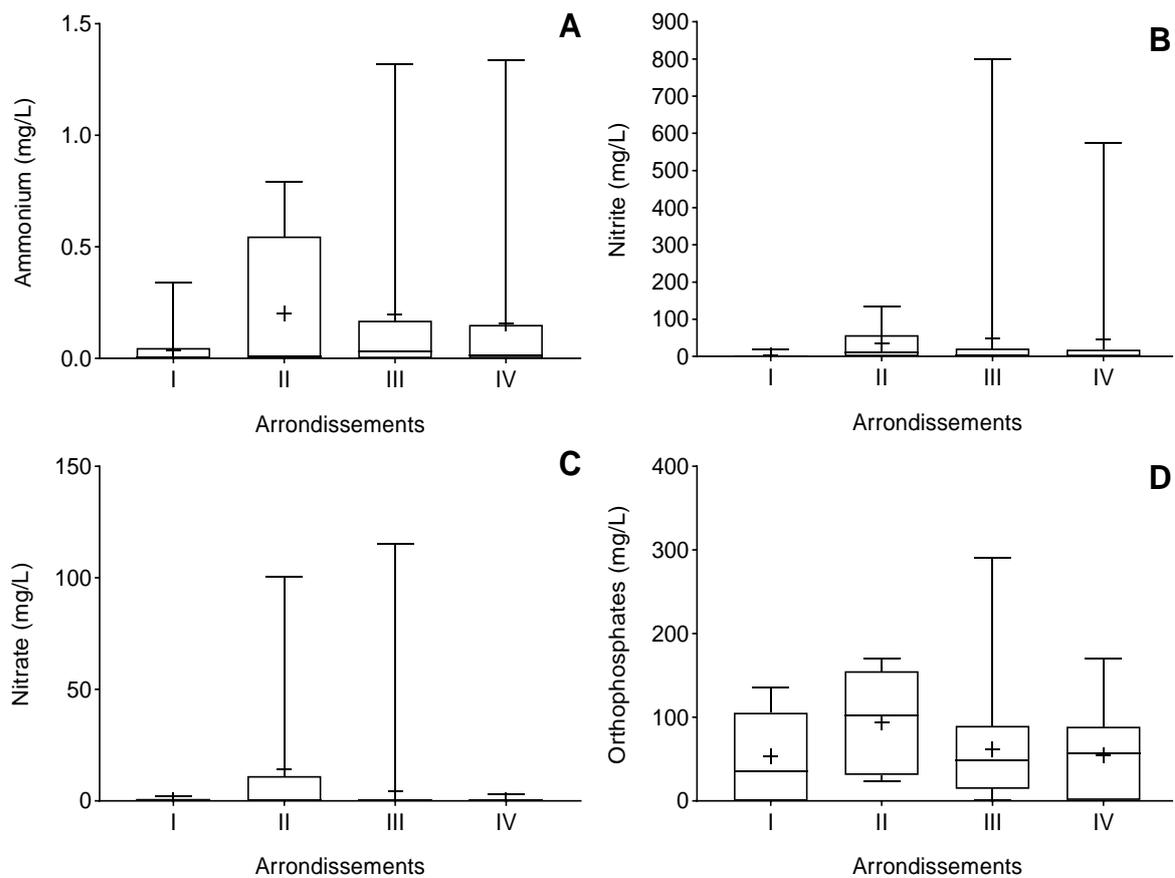
La teneur moyenne en azote ammoniacal a été de  $0,15 \text{ mg/L}$  de  $\text{NH}_4^+$  ( $0 \text{ mg/L}$  de  $\text{NH}_4^+ - 1,34 \text{ mg/L}$  de  $\text{NH}_4^+$ ). Les teneurs faibles ont été enregistrées dans les 1<sup>er</sup> et 2<sup>e</sup> arrondissements. Par contre, les valeurs élevées ont été obtenues dans les 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements (Fig.11A). Les oscillations de cette teneur en azote ammoniacal n'ont présenté aucune différence significative ( $p > 0,05$ ) entre les arrondissements (Tableau XIV).

La teneur moyenne en nitrites a été de  $38,22 \text{ mg.L}^{-1}$  ( $0 \text{ mg.L}^{-1} - 80 \text{ mg.L}^{-1}$ ); les valeurs faibles de nitrites ont été enregistrées dans la majorité des puits. Les valeurs relativement plus

élevées ont été obtenues dans les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> arrondissements (Fig.11B). Ces valeurs n'ont montré aucune différence significative ( $p > 0,05$ ) entre les arrondissements (Tableau XIV).

La teneur en nitrates a une valeur moyenne de 3,60 mg.L<sup>-1</sup> (0 mg.L<sup>-1</sup> - 115,18 mg.L<sup>-1</sup>) avec une différence significative ( $p < 0,05$ ) entre les arrondissements (Tableau XIV). Les teneurs élevées en nitrates sont enregistrées dans les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> arrondissements (Fig.11C).

La teneur moyenne en orthophosphates a été 60,58 mg.L<sup>-1</sup> (0 mg.L<sup>-1</sup> - 290 mg.L<sup>-1</sup>) avec un pic de 290 mg.L<sup>-1</sup> enregistré dans le 3<sup>e</sup> l'arrondissement (Fig.11D). Aucune différence significative ( $p > 0,05$ ) n'a été notée entre les différents arrondissements (Tableau XIV).



**Figure 11:** Box plots présentant la variation spatiale des valeurs d'Ammonium (A), de Nitrites (B), de Nitrates (C) et d'Orthophosphates (D) des quatre arrondissements de la ville de Moundou au cours de l'étude. I, II, III et IV= arrondissements.

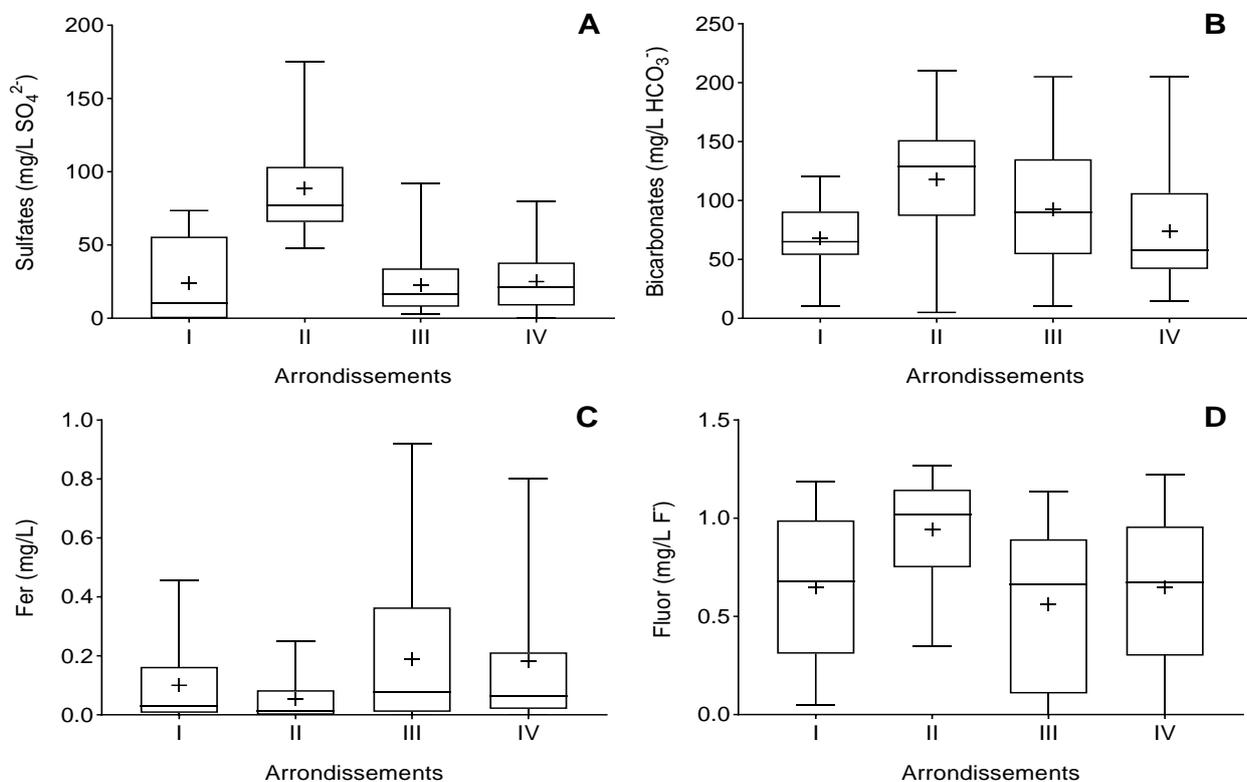
La valeur moyenne des sulfates dans les eaux a été de 30,39 mg.L<sup>-1</sup> (0 mg.L<sup>-1</sup> - 175 mg.L<sup>-1</sup>) (Fig.12A) ; la teneur en sulfates a montré une différence significative ( $p < 0,05$ ) pour les quatre arrondissements. Aucune différence significative ( $p > 0,05$ ) n'a été notée entre les différents arrondissements (Tableau XIV).

La teneur moyenne en bicarbonates a été de 82,93 mg.L<sup>-1</sup> (5 mg.L<sup>-1</sup> - 210 mg.L<sup>-1</sup>) avec des teneurs relativement plus élevées dans les 2<sup>e</sup>, 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements (Fig.12B). Une

différence significative ( $p > 0,05$ ) en bicarbonates a été notée entre les différents arrondissements (Tableau XIV).

La teneur moyenne du fer a été de  $0,13 \text{ mg.L}^{-1}$  ( $0 \text{ mg.L}^{-1} - 0,90 \text{ mg.L}^{-1}$ ) ; les valeurs relativement élevées en fer ont été enregistrées dans le 2<sup>e</sup> arrondissement (Fig.12C). Aucune différence significative ( $p > 0,05$ ) n'a été notée entre les différents arrondissements (Tableau XIV).

La valeur moyenne des ions fluorures enregistrée a été de  $0,67 \text{ mg.L}^{-1}$  ( $0 \text{ mg.L}^{-1}$  et  $1,27 \text{ mg.L}^{-1}$ ) ; d'une façon générale, la concentration en ions fluorures est faible dans les eaux des puits de la ville de Moundou (Fig.12D) et aucune différence significative ( $p > 0,05$ ) n'a été notée entre les différents arrondissements (Tableau XIV).



**Figure 12:** Box plots présentant la variation spatiale des valeurs de Sulfates (A), du Fer (B), du Bicarbonates (C) et du Fluor (D) des quatre arrondissements de la ville de Moundou au cours de l'étude. I, II, III et IV= arrondissements.

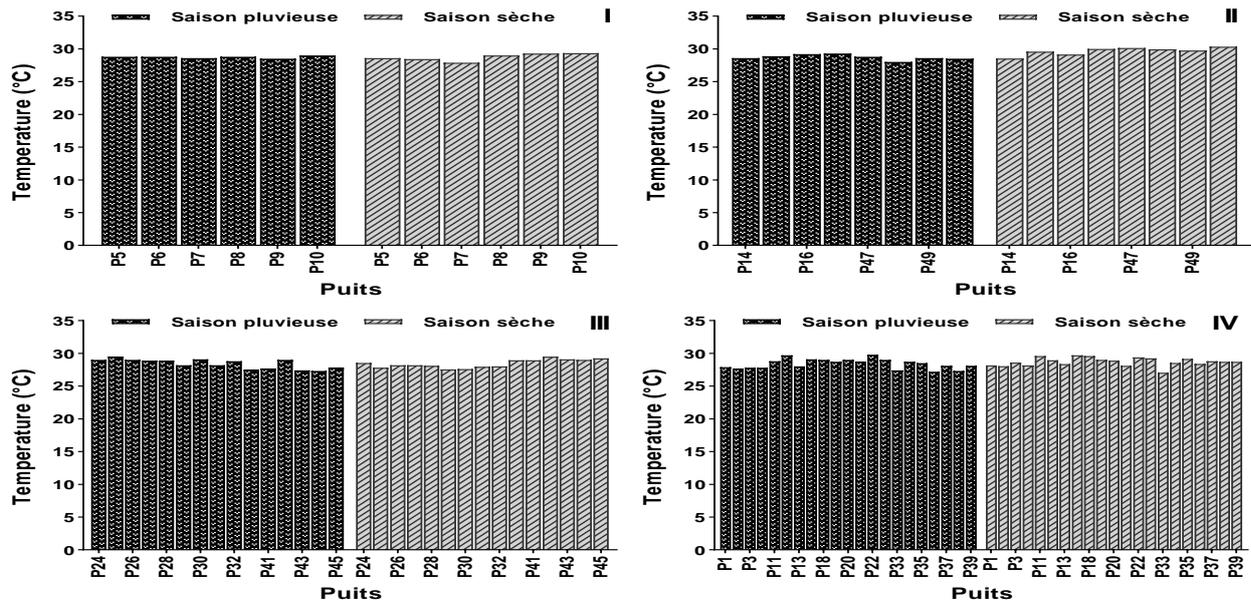
### III.1.2.2. Variations saisonnières des paramètres physicochimiques des eaux étudiées

#### III.1.2.2.1. Variations saisonnières des paramètres physiques

Les valeurs moyennes saisonnières des paramètres physiques des eaux souterraines étudiées ont variés d'une station à une autre et sont représentées par les figures ci-dessous.

### III.1.2.2.1.1. Température des eaux souterraines de la ville de Moundou

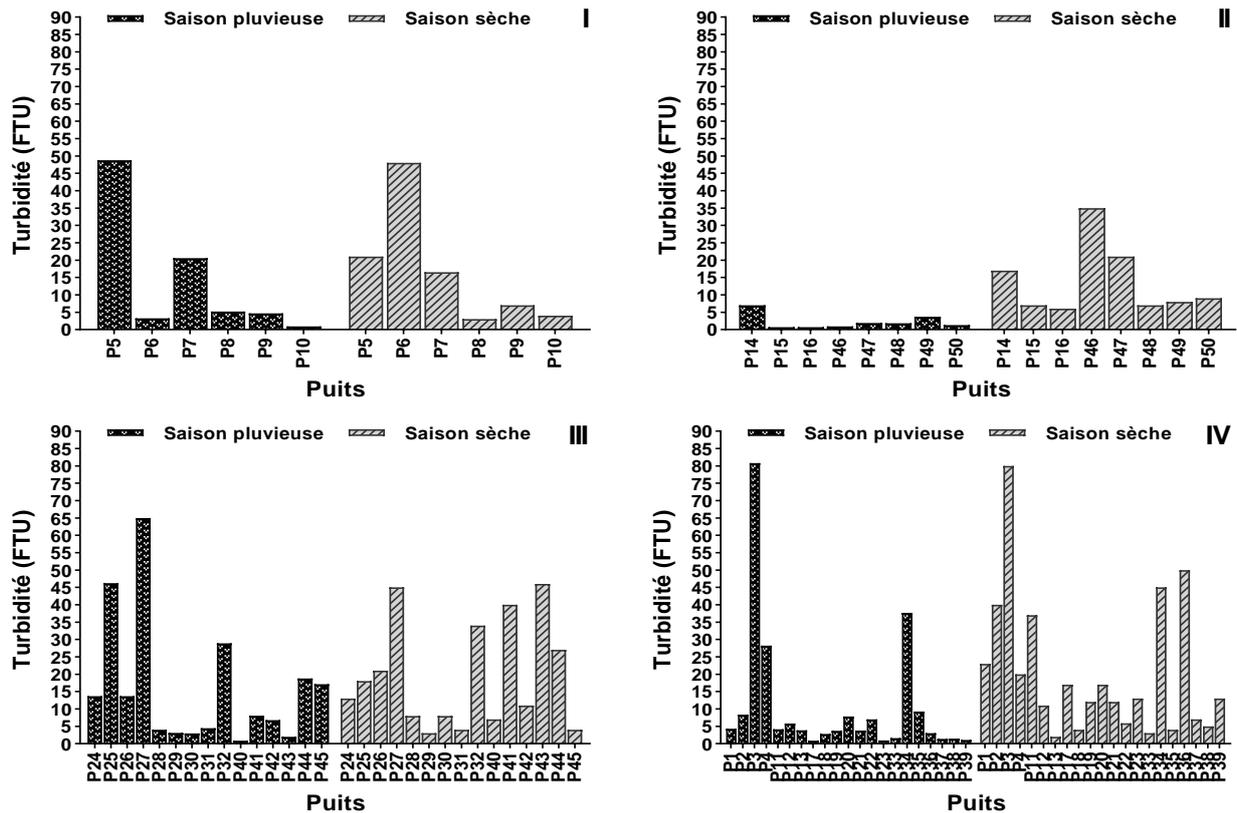
Dans tous les puits et pendant les deux saisons, la température moyenne des eaux a été supérieure à la norme recommandée par l’OMS pour les eaux souterraines qui était de 25°C (Annexe 2). Les valeurs moyennes élevées des températures ont été enregistrées en saison sèche dans les stations P46, P47, P48, P49 et P50 (Fig.13II). Une différence significative ( $p < 0,05$ ) de la variation saisonnière de la température a été notée entre les stations des 2<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements (Annexe 3).



**Figure 13:** Variation saisonnière de la température dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. I, II, III et IV= arrondissements

### III.1.2.2.1.2 Turbidité des eaux souterraines de la ville de Moundou

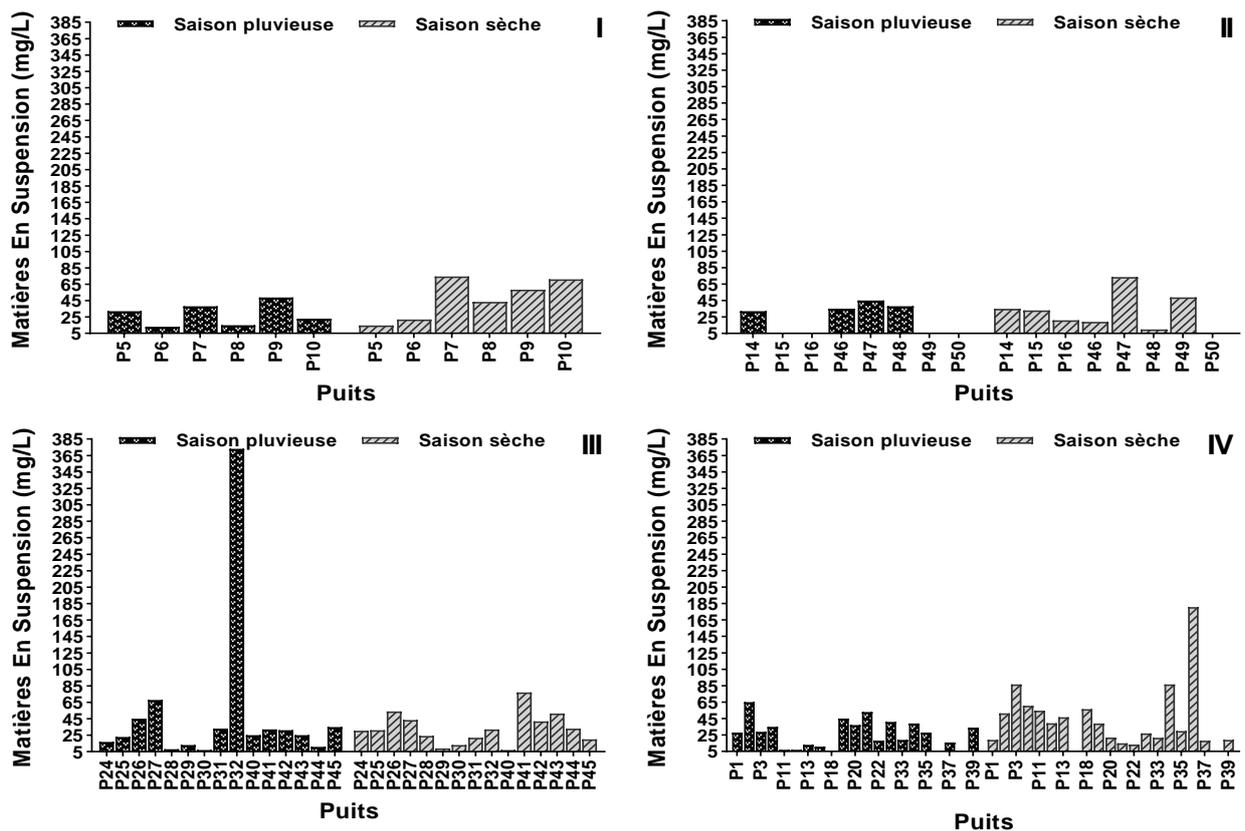
La valeur moyenne de la turbidité des eaux des puits étudiées a été de 10,26 FTU (2,25 FTU - 15,73 FTU) en saison de pluies et de 17,41 FTU (13,75 FTU - 20,04 FTU) en saison sèche (Annexe 2). Ces valeurs ont été pour la plupart supérieures à la norme fixée par l’OMS qui est de 5 FTU (Fig 14). Ce qui témoigne que ces eaux sont très turbides. Les valeurs pics de la turbidité ont été enregistrées dans les puits P27 (65 FTU) pendant la saison des pluies (Fig 14III) et puits P3 (80 FTU) pendant les deux saisons (Fig.14IV). D’autres valeurs relativement élevées ont été relevées pendant la saison pluvieuse dans les puits P5 (48,8 FTU) et en saison sèche dans le P6 (48 FTU) (Fig 14I). Des valeurs relativement faibles ont été notées au niveau des puits P28, P29, P30, P31 et P40 (Fig.14). Une différence significative ( $p < 0,05$ ) de la variation saisonnière de la turbidité a été notée entre les stations des 2<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements (Annexe 3).



**Figure 14:** Variation saisonnière de la turbidité dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. I, II, III et IV= arrondissements

### III.1.2.2.1.3. Matières En Suspension des eaux souterraines de la Ville de Moundou

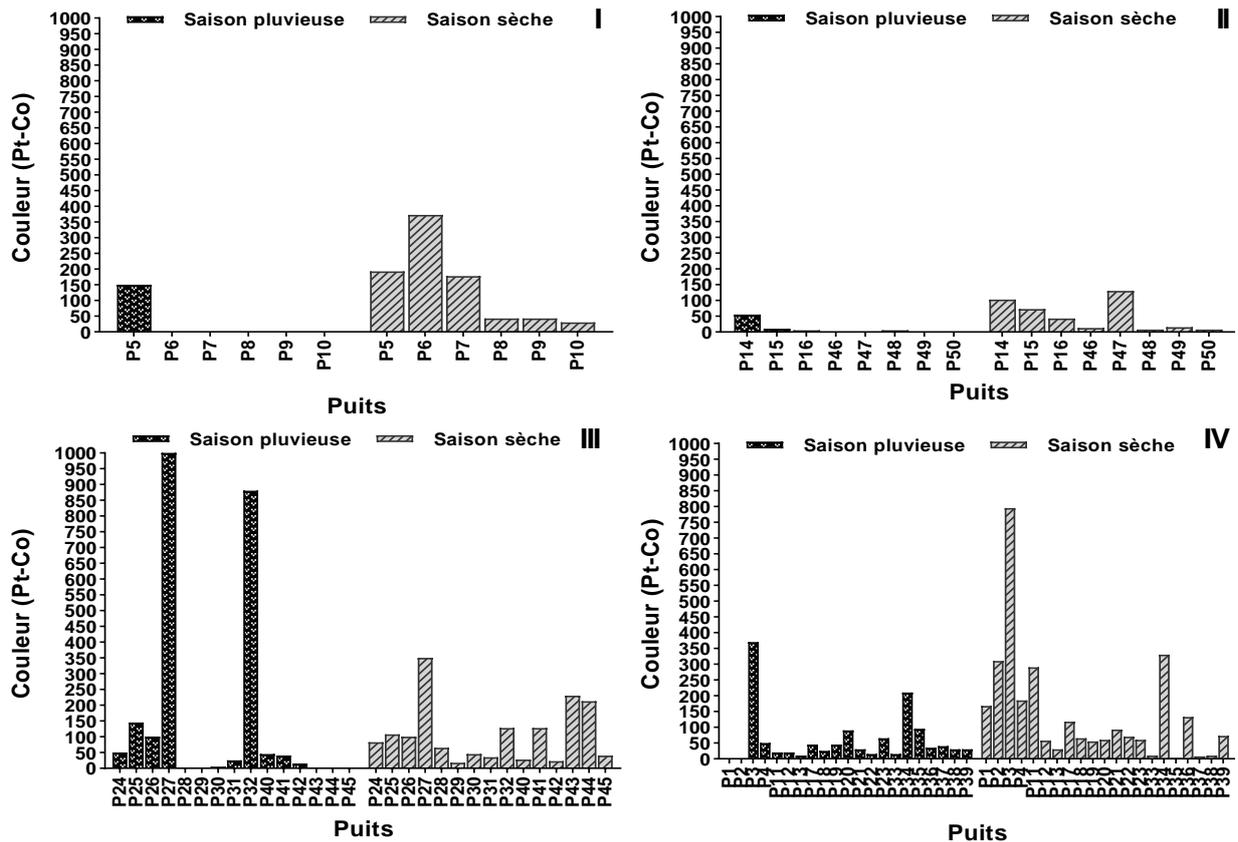
La valeur moyenne de la teneur en MES pour les quatre arrondissements a été de 31 mg.L<sup>-1</sup> (20,25mg.L<sup>-1</sup> - 49,73mg.L<sup>-1</sup>) pendant la saison pluvieuse et de 38,26 mg.L<sup>-1</sup> (30 mg.L<sup>-1</sup>, 56-47,33 mg.L<sup>-1</sup>) en saison sèche. Des valeurs relativement élevées ont été relevées dans les puits P32 (373 mg.L<sup>-1</sup>) (Fig.15III) et P36 (180,5 mg.L<sup>-1</sup>) (Fig.15IV). Aucune différence significative ( $p > 0,05$ ) a été noté entre les stations dans les quatres arrondissements de la ville de Moundou (Annexe 3).



**Figure 15:** Variation saisonnière des Matières En Suspension dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. I, II, III et IV= arrondissements

#### III.1.2.2.1.4. Couleur des eaux souterraines de la ville de Moundou

Les résultats des analyses de la couleur des eaux ont montré des valeurs moyennes de 61,78 Pt-Co (9,37 Pt-Co - 153,7 Pt-Co) pendant la saison des pluies et de 109,17 Pt-Co (48,78 Pt-Co – 142,9) pendant la saison sèche. Les résultats de la couleur des eaux ont montré des valeurs nulles dans différentes stations du 1<sup>er</sup> et du 2<sup>e</sup> arrondissement pendant la saison des pluies (Fig.16I ; 16II). Les valeurs élevées ont été enregistrées aux puits P32 (880 Pt-Co) et P27 (1000 Pt-Co) (Fig.16III) pendant la saison pluvieuse. Pendant la saison sèche, la valeur élevée a été enregistrée au puits P3 (795 Pt-Co) (Fig.16IV). Les variations de la couleur ont présenté une différence significative ( $p < 0,05$ ) entre les puits des 2<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements (Annexe 3).

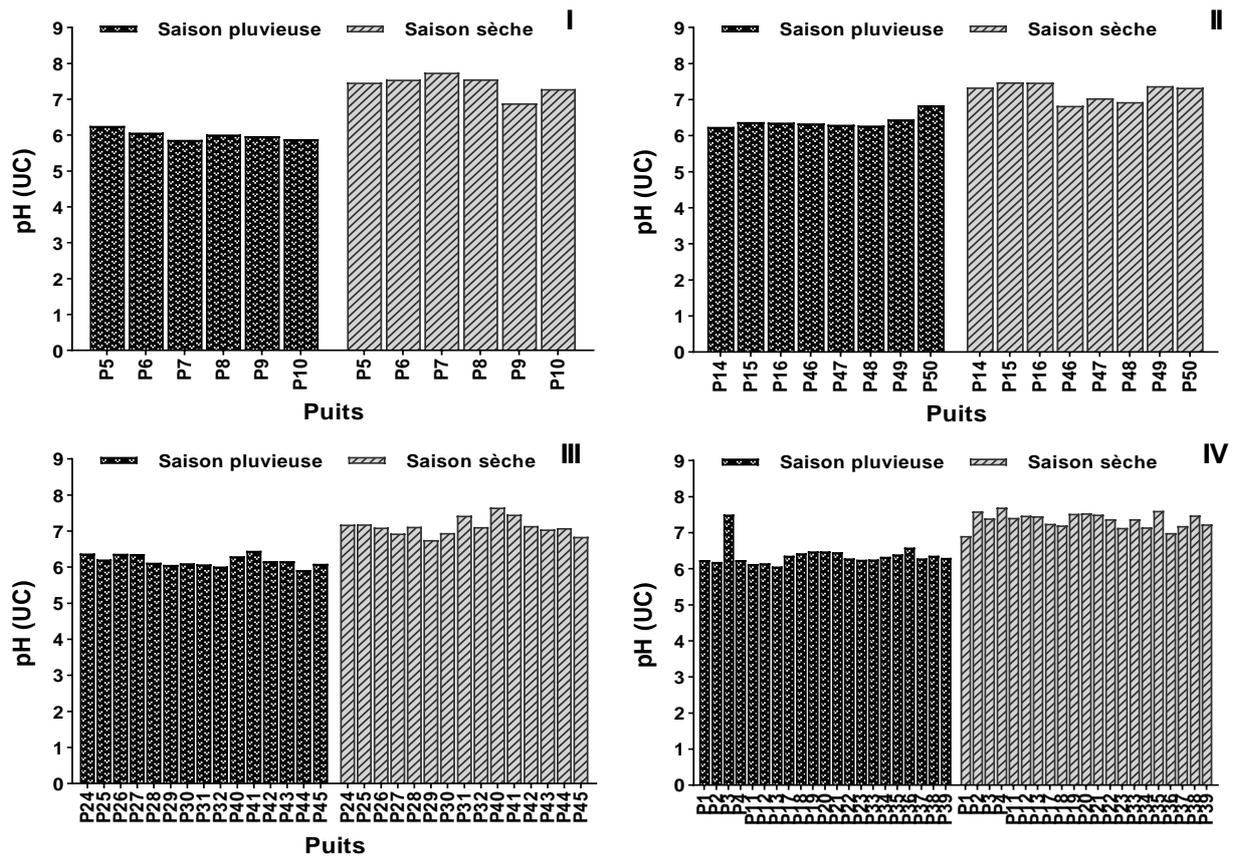


**Figure 16:** Variation saisonnière de la couleur dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. I, II, III et IV= arrondissements

### III.1.2.2.2. Variations saisonnières des caractéristiques chimiques

#### III.1.2.2.2.1. pH des eaux souterraines de la ville de Moundou

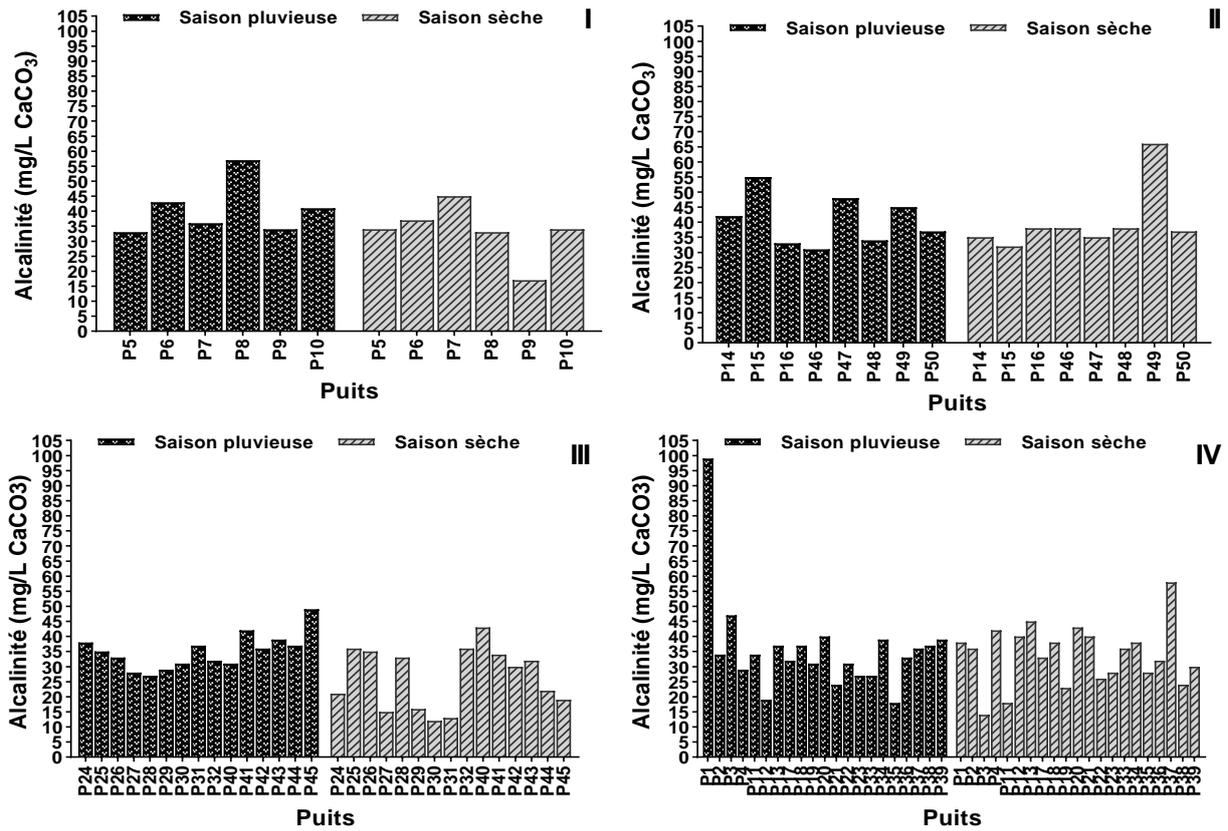
La valeur moyenne de pH pour l'ensemble des puits pendant la saison des pluies a été de 6,23 UC (6,01 UC - 6,39 UC) et une moyenne de 7,27 UC (7,13 UC - 7,41 UC) pendant la saison. La valeur moyenne du pH pendant les deux saisons de prélèvement a été de 6,77 UC ; ce qui indique que les eaux sont faiblement acides. Cependant, cette valeur est conforme à la norme recommandée par l'OMS pour les eaux de boisson qui est comprise entre  $6,5 < \text{pH} < 8,5$ . La variation saisonnière du pH a montré une différence significative ( $p < 0,05$ ) entre les stations des quatre arrondissements (Annexe 3).



**Figure 17:** Variation saisonnière du pH dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou.  
I, II, III et IV= arrondissements

### III.1.2.2.2. Alcalinité des eaux souterraines de la ville de Moundou

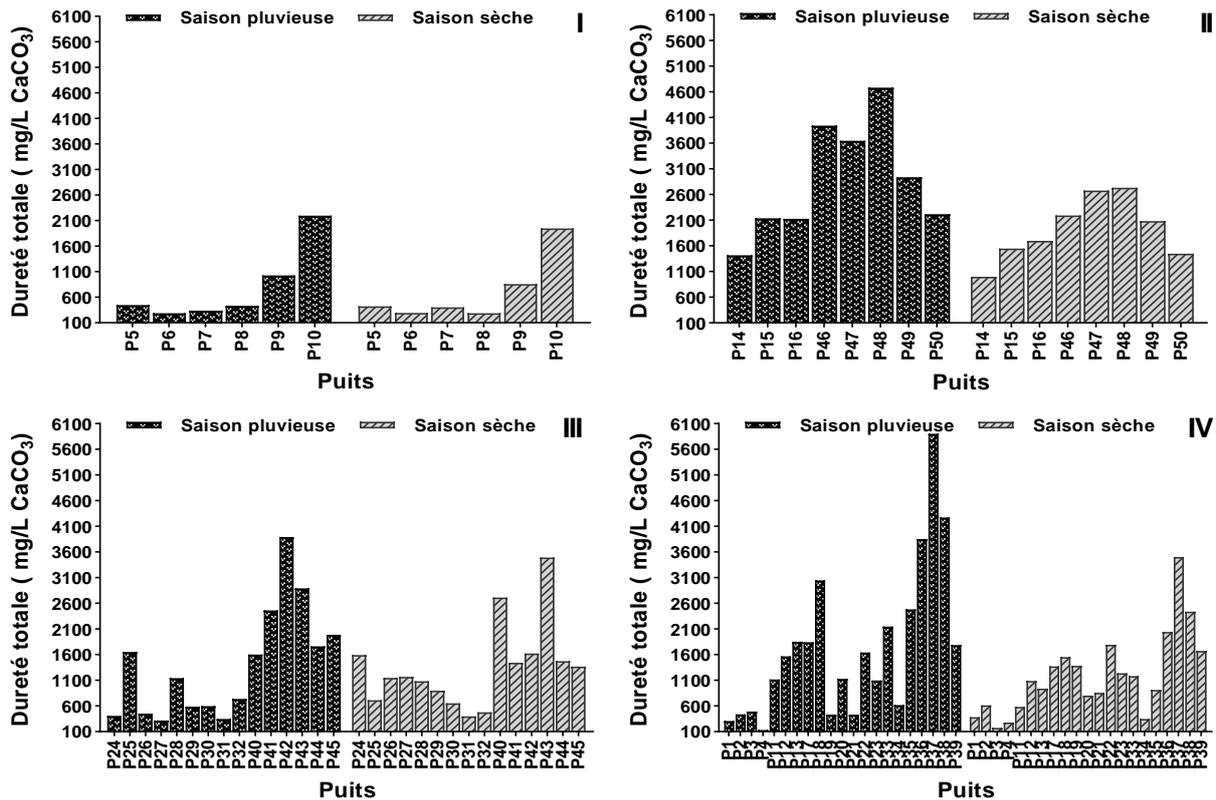
La teneur moyenne en alcalinité a été de  $38,01 \text{ mg.L}^{-1} \text{ HCO}_3^-$  ( $34,93 \text{ mg.L}^{-1} \text{ HCO}_3^-$  -  $40,67 \text{ mg.L}^{-1} \text{ HCO}_3^-$ ) pendant la saison des pluies et une teneur moyenne de  $33,37 \text{ mg.L}^{-1} \text{ HCO}_3^-$  ( $26,47 \text{ mg.L}^{-1} \text{ HCO}_3^-$  -  $39,88 \text{ mg.L}^{-1} \text{ HCO}_3^-$ ) pendant la saison sèche. Les valeurs relativement élevées ont été enregistrées aux puits P1 ( $99 \text{ mg.L}^{-1} \text{ HCO}_3^-$ ) et P2 ( $334 \text{ mg.L}^{-1} \text{ HCO}_3^-$ ) en saison des pluies (Fig.18IV). Une différence significative ( $p < 0,05$ ) a été enregistrée entre les stations du 3<sup>e</sup> arrondissement (Annexe 3).



**Figure 18:** Variation saisonnière de l'alcalinité dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. I, II, III et IV= arrondissements.

### III.1.2.2.3. Dureté totale des eaux souterraines de la ville de Moundou

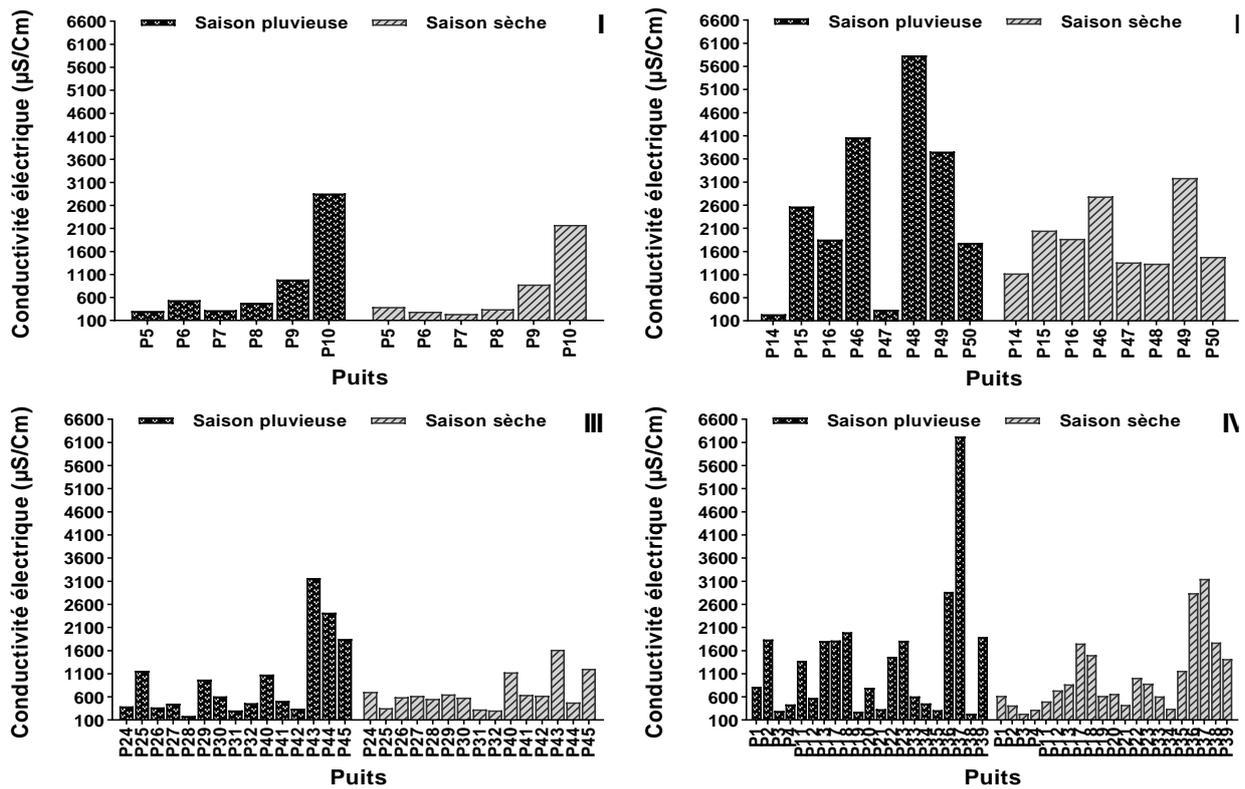
La valeur moyenne de la dureté totale a été de 1746 mg.L<sup>-1</sup> (787,20 mg.L<sup>-1</sup> - 2888 mg.L<sup>-1</sup>) pendant la saison des pluies et de 1292,13 mg.L<sup>-1</sup> (701,50 701,50 - 1921 mg.L<sup>-1</sup>) pendant la saison sèche. Les eaux des puits ont été dures avec des valeurs élevées pendant les deux saisons dans la plupart des puits (Fig.19). Une différence significative de la dureté totale a été notée au niveau des stations des 2<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements (Annexe 3).



**Figure 19:** Variations saisonnière de la dureté totale dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. I, II, III et IV= arrondissements.

**III.1.2.2.2.4. Conductivité électrique des eaux souterraines de la ville de Moundou**

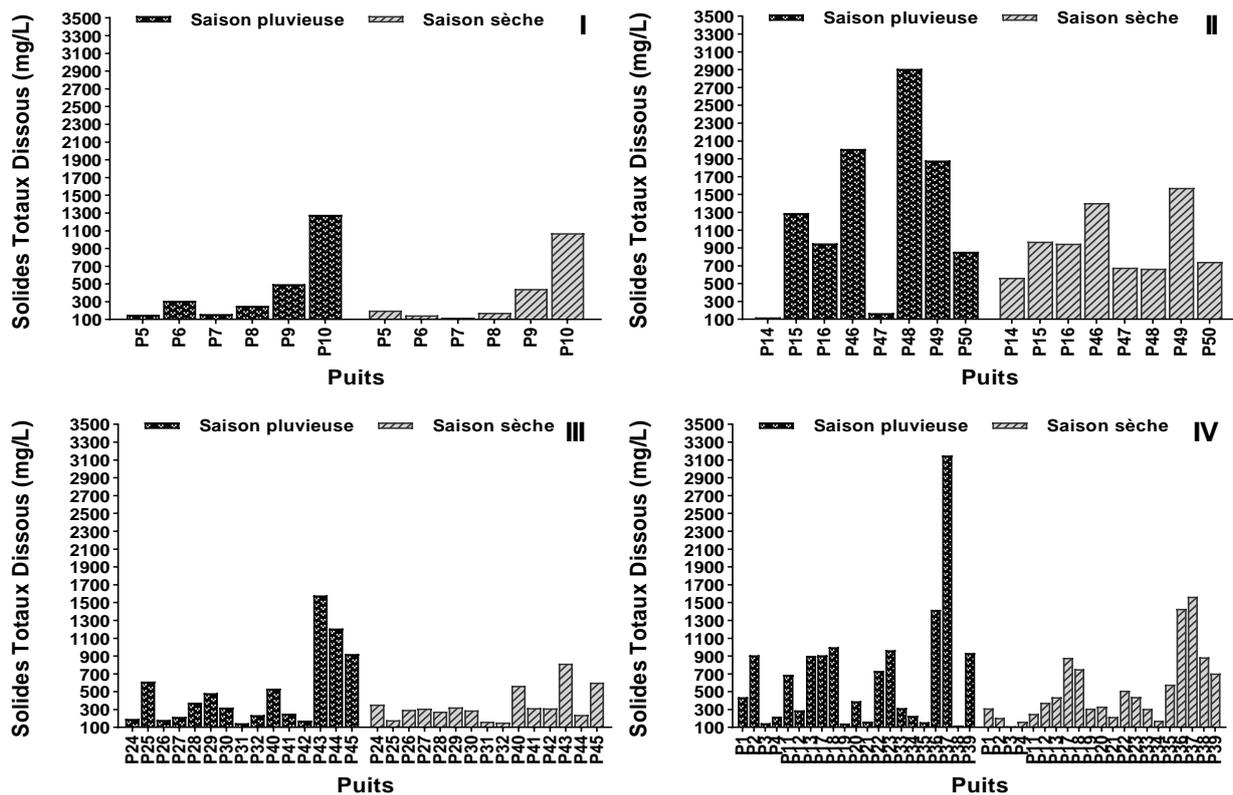
La valeur moyenne de la conductivité électrique a été de 1542  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (917  $\mu\text{S}/\text{cm}$  - 2559  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) pendant la saison des pluies et de 1091  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (695,20  $\mu\text{S}/\text{cm}$  - 1902  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) pendant la saison sèche. Des valeurs relativement élevées de la conductivité électrique ont été enregistrées aux puits P48 (5840  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), P46 (4070  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), P43 (3170  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), P44 (2420  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en saison des pluies et aux puits P36 (2842  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), P37 (3150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en saison sèche (Fig.20). Aucune différence significative ( $p > 0,05$ ) n'a été notée entre les stations des quatre arrondissements de la ville de Moundou (Annexe 3).



**Figure 20:** Variations saisonnière de la conductivité électrique dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. I, II III et IV= arrondissements

### III.1.2.2.2.5. Solides Totaux Dissous des eaux souterraines de la ville de Moundou

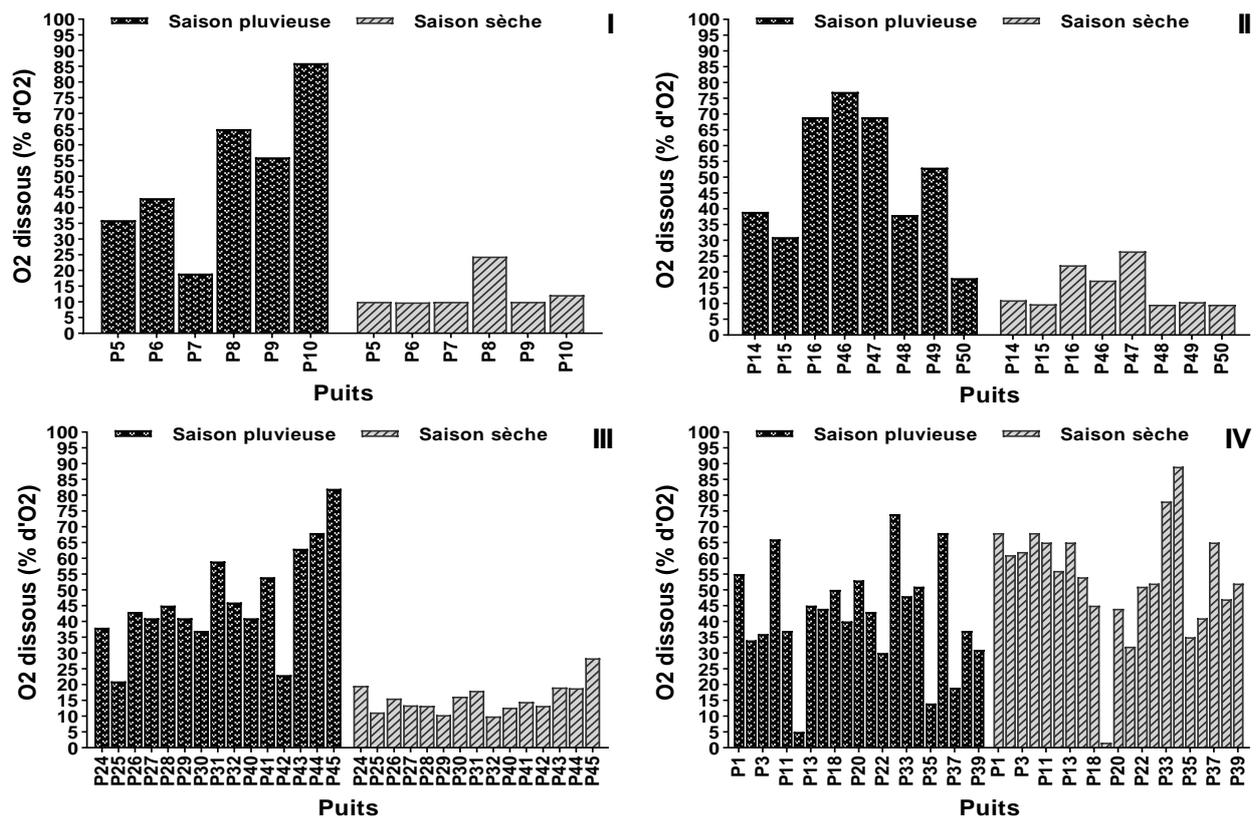
La valeur de TDS a oscillé autour d'une moyenne de 768,10 mg.L<sup>-1</sup> (442,80 mg.L<sup>-1</sup> - 1274 mg.L<sup>-1</sup>) pendant la saison des pluies et de 543,45 mg.L<sup>-1</sup> (347,5 mg.L<sup>-1</sup> - 944,8 mg.L<sup>-1</sup>) pendant la saison sèche. . Des valeurs relativement élevées des Solides Totaux Dissous (TDS) ont été relevées aux puits P37 (3150 mg.L<sup>-1</sup>) et P48 (2910 mg.L<sup>-1</sup>) pendant la saison des pluies (Fig. 21 II et 21IV). Aucune différence significative ( $p > 0,05$ ) n'a été notée entre les stations des quatre arrondissements de la ville de Moundou (Annexe 3).



**Figure 21:** Variation saisonnière des Solides Totaux Dissous dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. I, II, III et IV= arrondissements

### III.1.2.2.2.6. Pourcentage de l’oxygène dissous des eaux souterraines de la ville de Moundou

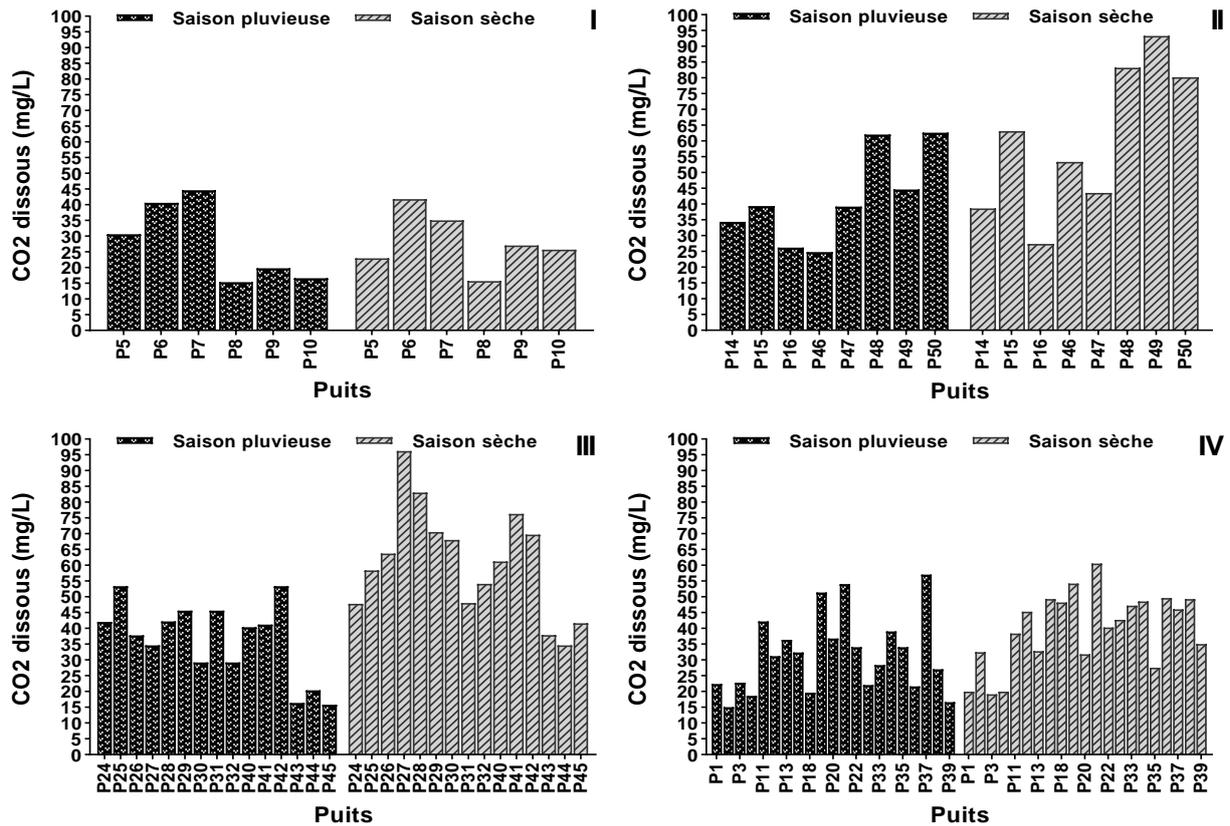
Les fluctuations des valeurs moyennes du pourcentage de saturation en oxygène ont été respectivement comprises entre 47% (42% - 51%) pendant la saison des pluies et entre 24% (13% - 54%) pendant la saison sèche. Les valeurs supérieures à 60% ont été enregistrées aux puits P8 (65% d’O<sub>2</sub>) et P10 (86% d’O<sub>2</sub>) (Fig.22I); aux puits P16 (69% d’O<sub>2</sub>), P46 (77% d’O<sub>2</sub>) et P47 (69% d’O<sub>2</sub>) (Fig.22II); aux puits P43 (63% d’O<sub>2</sub>), P44 (68% d’O<sub>2</sub>) et P45 (82% d’O<sub>2</sub>) (Fig.22III) et au puits P4 (66% d’O<sub>2</sub>) pendant la saison des pluies. Ses valeurs ont été restées en deça ou nulles dans la majorité des stations pendant la saison sèche (Fig.22). La variation saisonnière du pourcentage de saturation en oxygène a montré des différences significatives ( $p < 0,05$ ) dans l’ensemble des quatre arrondissements (Annexe 3).



**Figure 22:** Variations saisonnière du pourcentage d'oxygène dissous dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. I, II, III et IV= arrondissements

### III.1.2.2.2.7. Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dissous des eaux souterraines de la ville de Moundou

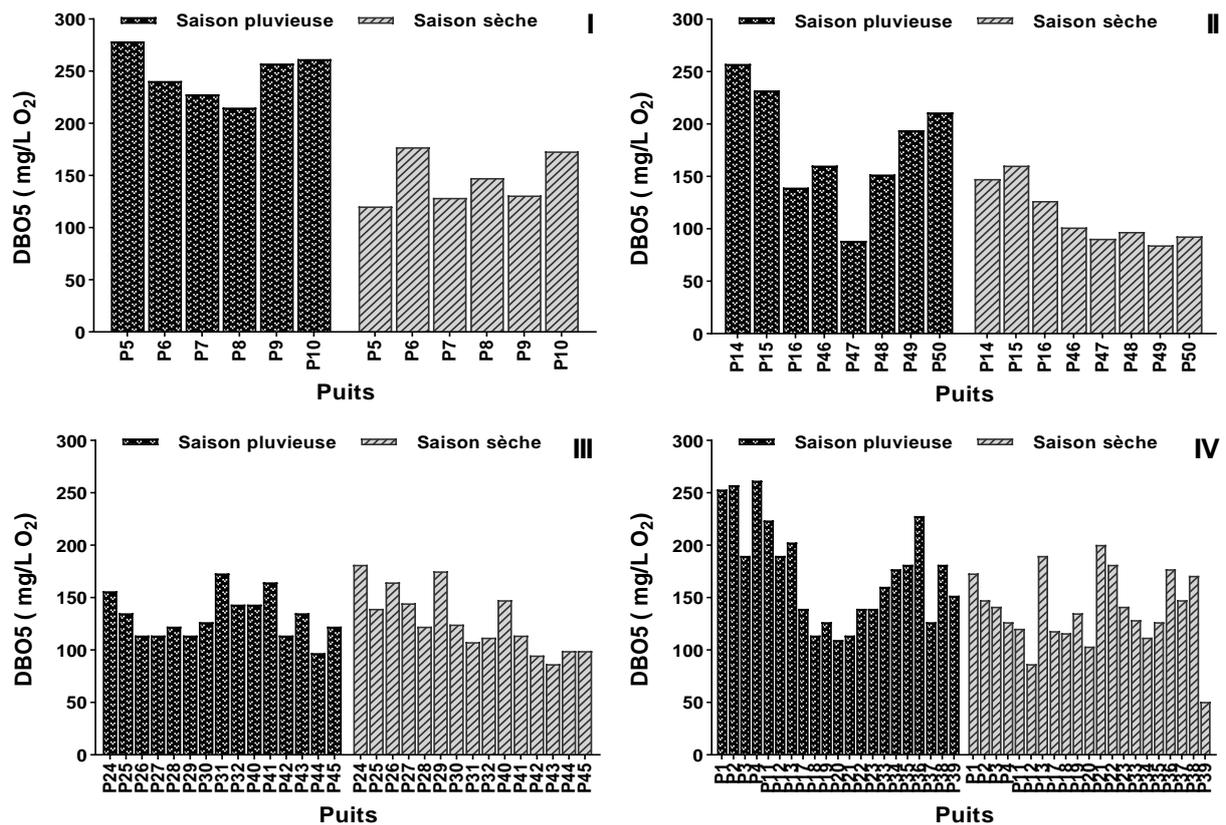
Pour le gaz carbonique dissous, les valeurs moyennes ont été de 34,53 mg.L<sup>-1</sup> (28 mg.L<sup>-1</sup>- 41,6 mg.L<sup>-1</sup>) pendant la saison des pluies et 47,25 mg.L<sup>-1</sup> (28 mg.L<sup>-1</sup> - 60,73 mg.L<sup>-1</sup>) pendant la saison sèche. Les valeurs du gaz carbonique dissous enregistrées ont été faibles dans les eaux des puits pendant la saison des pluies. Des valeurs élevées ont été enregistrées dans tous les eaux des puits pendant la saison sèche (Fig.23). Une significative ( $p < 0,05$ ) entre les stations a été notée au niveau des 2<sup>e</sup>, 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements (Annexe 3).



**Figure 23:** Variation saisonnière du Dioxyde de carbone dissous dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. I, II, III et IV= arrondissements

### III.1.2.2.2.8. Demande biochimique en oxygène pendant cinq jours (DBO<sub>5</sub>) des eaux souterraines de la ville de Moundou

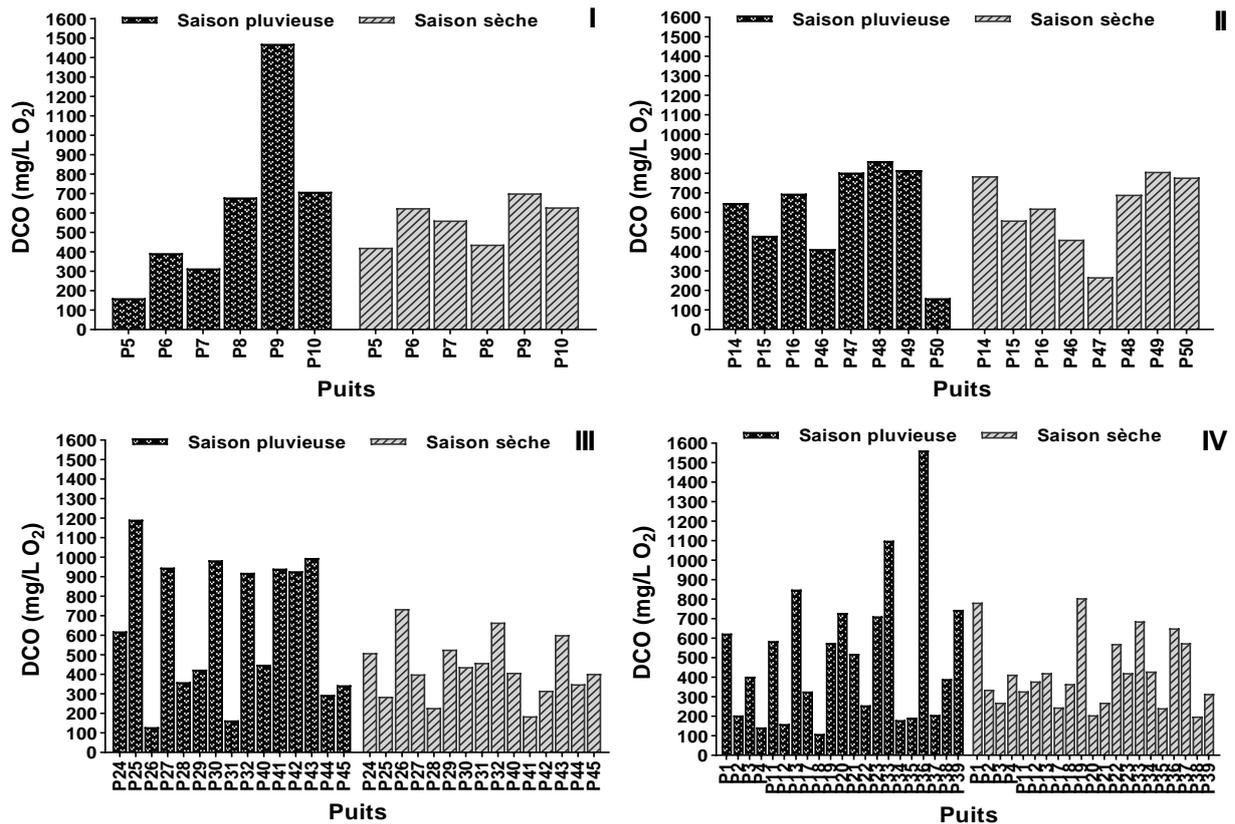
La valeur moyenne de la DBO<sub>5</sub> a été 185,20 mg.L<sup>-1</sup> d'O<sub>2</sub> (131,7 mg.L<sup>-1</sup> d'O<sub>2</sub> - 247 mg.L<sup>-1</sup> d'O<sub>2</sub>) pendant la saison des pluies et de 131,08 mg.L<sup>-1</sup> d'O<sub>2</sub> (112,6 mg.L<sup>-1</sup> d'O<sub>2</sub> - 146,3 mg.L<sup>-1</sup> d'O<sub>2</sub>) pendant la saison sèche. Dans la majorité des stations, les valeurs moyennes maximales de la DBO<sub>5</sub> ont été notées en saison pluvieuse alors que les minimales sont enregistrées en saison sèche (Fig.24).). Une différence significative ( $p < 0,05$ ) entre les stations a été notée au niveau des 1<sup>er</sup>, 2<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements (Annexe 3).



**Figure 24:** Variation saisonnière de la Demande biochimique en oxygène pendant cinq jours dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou.  
I, II, III et IV= arrondissements

### III.1.2.2.2.9. Demande chimique en oxygène (DCO) des eaux souterraines de la ville de Moundou

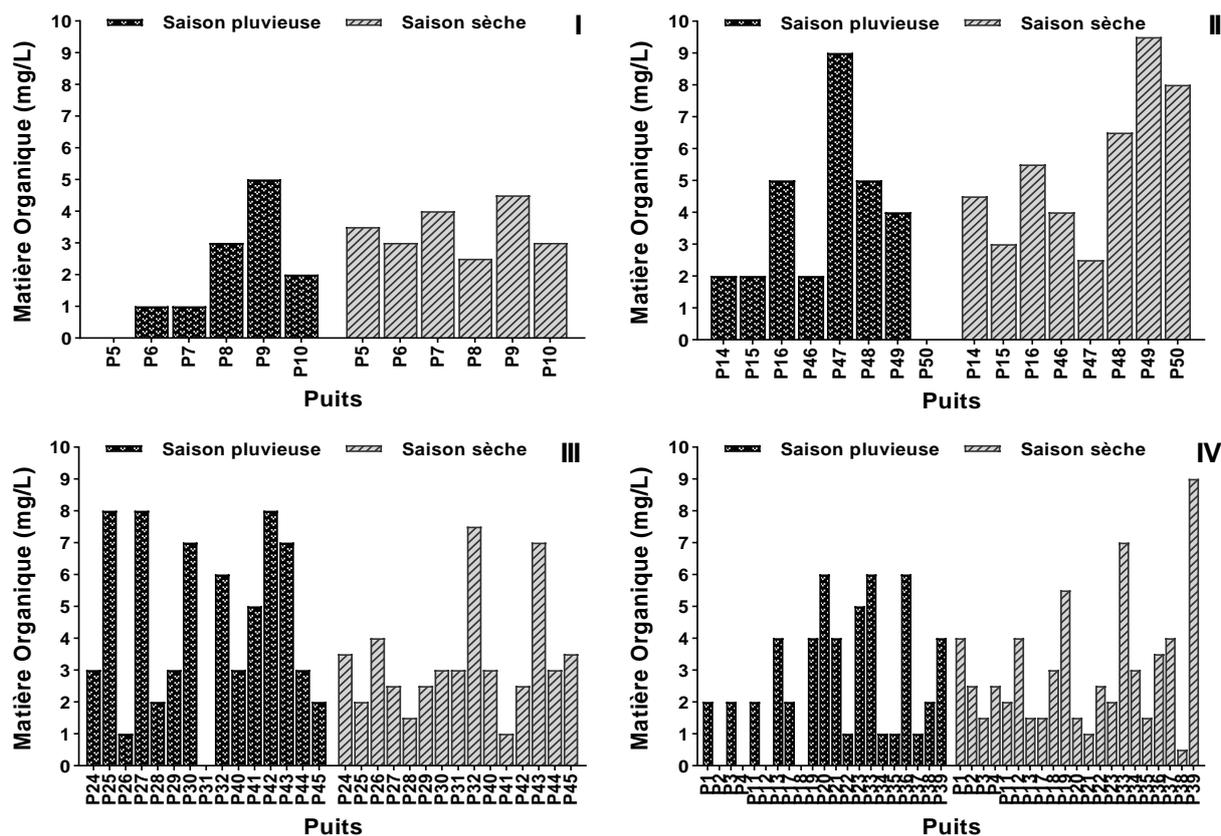
La valeur moyenne de la DCO a été de  $5889 \text{ mg.L}^{-1} \text{ d'O}_2$  ( $504 \text{ mg.L}^{-1} \text{ d'O}_2$  -  $646,7 \text{ mg.L}^{-1} \text{ d'O}_2$ ) pendant la saison des pluies et de  $511 \text{ mg.L}^{-1} \text{ d'O}_2$  ( $425 \text{ mg.L}^{-1} \text{ d'O}_2$  -  $621,5 \text{ mg.L}^{-1} \text{ d'O}_2$ ) pendant la saison sèche. La demande chimique en oxygène (DCO) a montré des valeurs élevées dans les différentes stations durant les deux saisons d'étude (Fig.25). Aucune différence significative ( $p > 0,05$ ) n'a été notée entre les stations d'une saison à l'autre dans les quatre arrondissements (Annexe 3).



**Figure 25:** Variation saisonnière de la Demande chimique en oxygène dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. I, II, III et IV= arrondissements

**III.1.2.2.2.10. Matière organique des eaux souterraines de la ville de Moundou**

La valeur moyenne de la matière organique caractérisées par le rapport DCO/DBO<sub>5</sub> a été de 3,16 mg.L<sup>-1</sup> d'O<sub>2</sub> (2 mg.L<sup>-1</sup> d'O<sub>2</sub> - 4,4 mg.L<sup>-1</sup> d'O<sub>2</sub>) pendant la saison des pluies et de 3,8 mg.L<sup>-1</sup> d'O<sub>2</sub> (3 mg.L<sup>-1</sup> d'O<sub>2</sub>- 5,43 mg.L<sup>-1</sup> d'O<sub>2</sub>) pendant la saison sèche. Les eaux ont révélé une forte charge organique se traduit par des rapports DBO<sub>5</sub> et DCO supérieures à 1 mg.L<sup>-1</sup> d'O<sub>2</sub> (Fig.26). Aucune différence significative (p > 0,05) n'a été notée entre les stations d'une saison à l'autre dans les quatre arrondissements (Annexe 3).



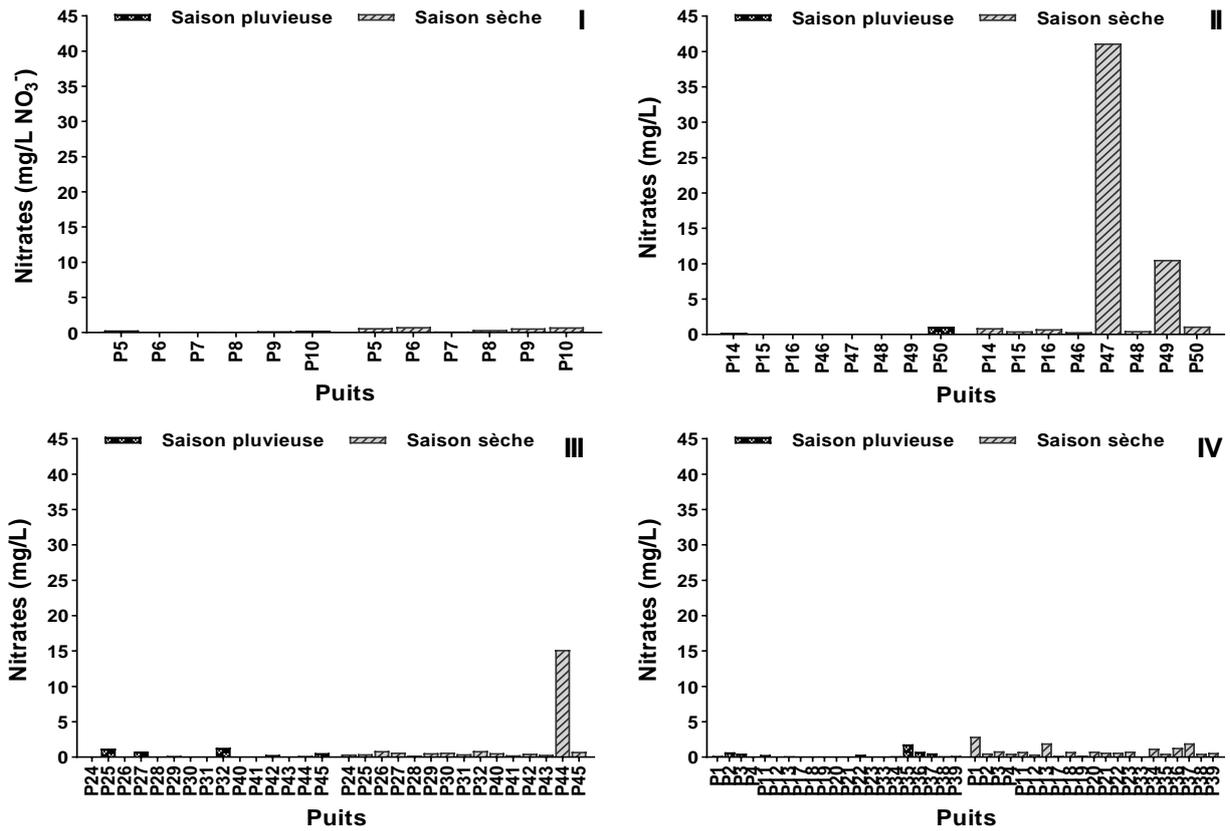
**Figure 26 :** Variation saisonnière de la matière organique dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. I, II, III et IV= arrondissements

### III.1.2.2.3. Formes d'azote et les orthophosphates

Les concentrations des ions  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NO}_2^-$  enregistrées au niveau des eaux des puits de la ville de Moundou ont montré des teneurs faibles presque nulles pendant deux saisons d'étude.

#### III.1.2.2.3.1. Nitrates des eaux souterraines de la ville de Moundou

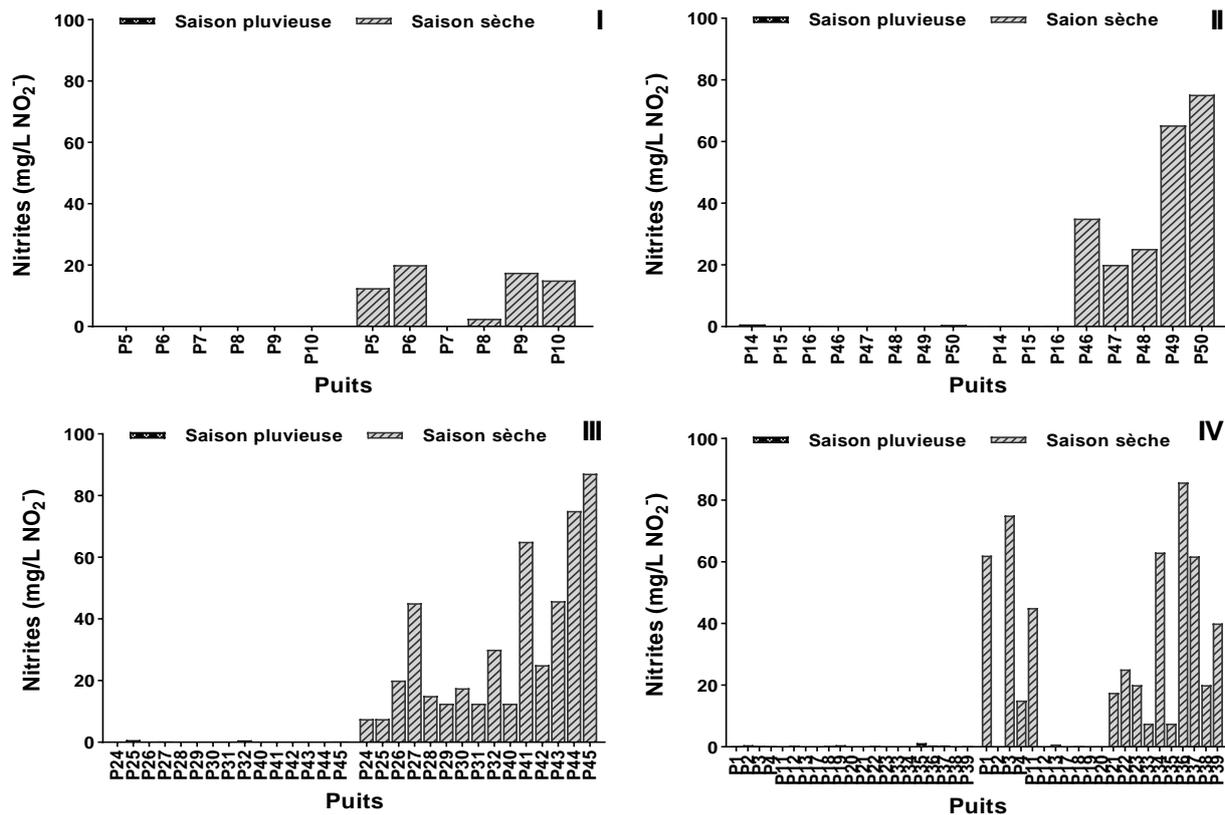
La teneur moyenne en nitrates a été de  $0,25 \text{ mg.L}^{-1}$  ( $0,19 \text{ mg.L}^{-1}$  -  $0,32 \text{ mg.L}^{-1}$ ) pendant la saison des pluies et de  $2,48 \text{ mg.L}^{-1}$  ( $0,566 \text{ mg.L}^{-1}$ -  $97 \text{ mg.L}^{-1}$ ) pendant la saison sèche. Les nitrates ont présenté des valeurs faibles en saison sèche excepté les puits P44 ( $15,2 \text{ mg.L}^{-1}$ ) (Fig.27), P47 ( $41,14 \text{ mg.L}^{-1}$ ) et P49 ( $10,56 \text{ mg.L}^{-1}$ ) qui ont montré des teneurs élevées (Fig.27II, 27III). Une différence significative ( $p < 0,05$ ) entre les stations a été notée au niveau des 1<sup>er</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements (Annexe 3).



**Figure 27:** Variation saisonnière des nitrates dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. I, II, III et IV= arrondissements

**III.1.2.2.3.2. Nitrites des eaux souterraines de la ville de Moundou**

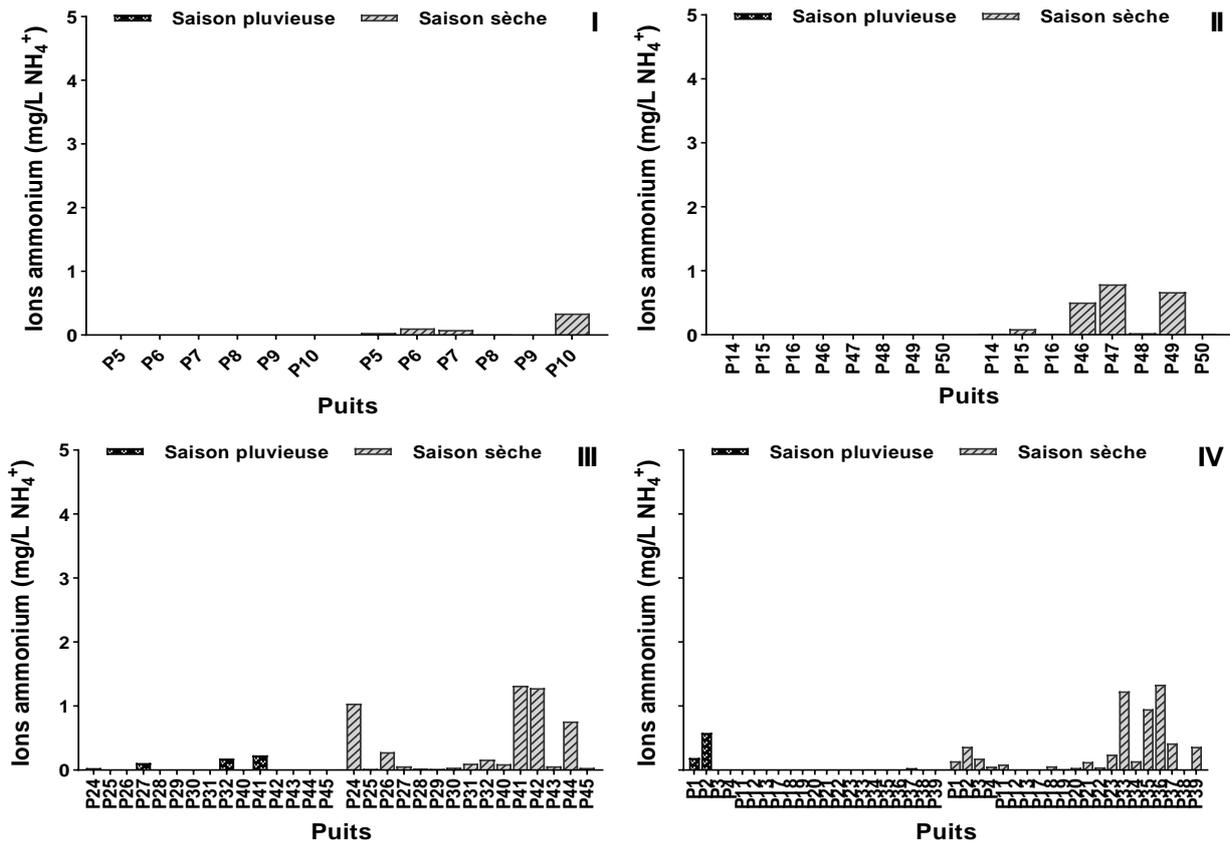
La teneur moyenne en nitrites des eaux souterraines étudiées a été de 0,21 mg.L<sup>-1</sup> NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (0,14 mg.L<sup>-1</sup> NO<sub>2</sub><sup>-</sup> - 0,28 mg.L<sup>-1</sup> NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) pendant la saison des pluies et de 24,22 mg.L<sup>-1</sup> NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (11,29 mg.L<sup>-1</sup> NO<sub>2</sub><sup>-</sup> - 32 mg.L<sup>-1</sup> NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) pendant la saison sèche. Les valeurs moyennes des teneurs en nitrites ont été presque nulles dans l’ensemble des stations pendant la saison des pluies (Fig.28). Des valeurs relativement élevées ont été enregistrées aux puits P1 (62 mg.L<sup>-1</sup> NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), P3 (75 mg.L<sup>-1</sup> NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), P34 (63 mg.L<sup>-1</sup> NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), P36 (85 mg.L<sup>-1</sup> NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), P41 (65 mg.L<sup>-1</sup> NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) P44 (75 mg.L<sup>-1</sup> NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) et P45 (87,15 mg.L<sup>-1</sup> NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) pendant la saison sèche (Fig.28). Une différence significative (p < 0,05) entre les stations a été notée au niveau des 2<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements (Annexe 3).



**Figure 28:** Variation saisonnière des nitrites dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. I, II , III et IV= arrondissements

### III.1.2.2.3.3. Ions ammonium des eaux souterraines de la ville de Moundou

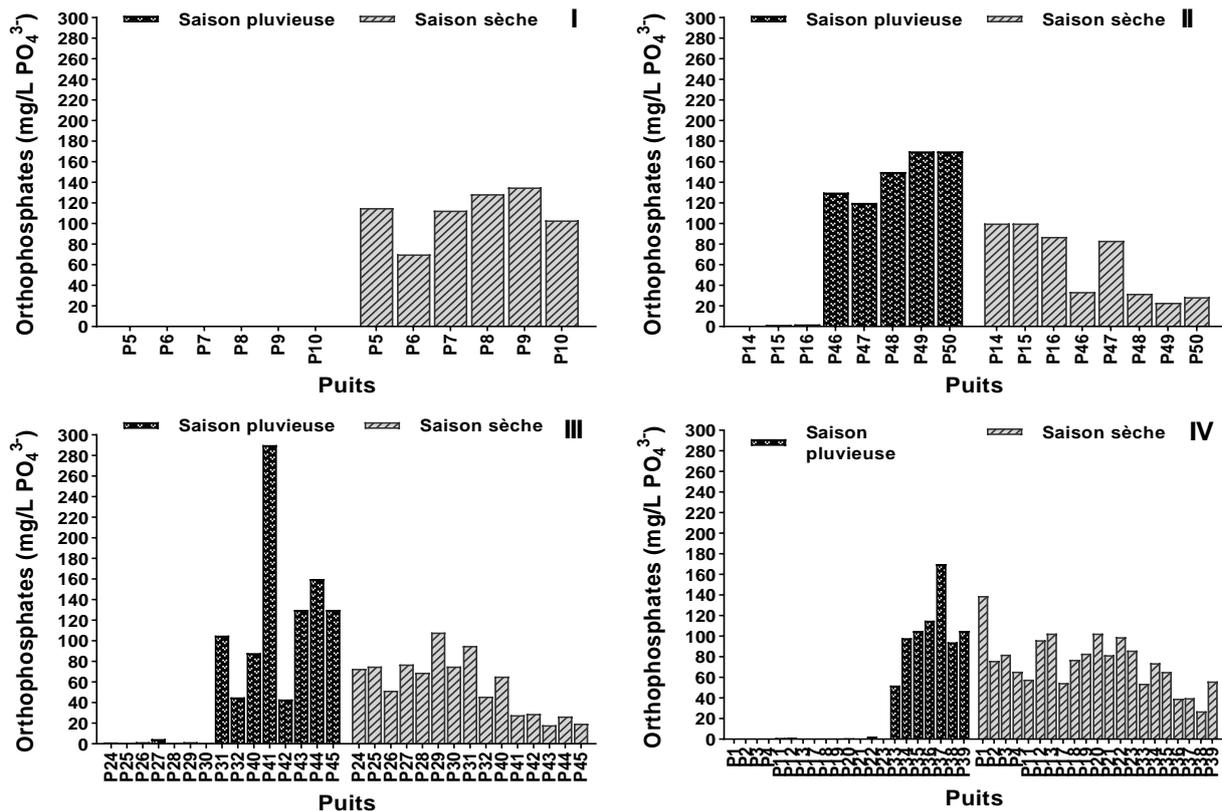
La teneur moyenne des eaux en ions ammoniums a été de 0,02 mg.L<sup>-1</sup> (0 mg.L<sup>-1</sup>- 0,04 mg.L<sup>-1</sup>) pendant la saison des pluies et de 0,24 mg.L<sup>-1</sup>(0,09 mg.L<sup>-1</sup> - 0,35 mg.L<sup>-1</sup>) pendant la saison sèche. Les valeurs moyennes des teneurs en ions ammonium ont été aussi presque nulles dans l'ensemble des stations pendant la saison des pluies (Fig.29). Les concentrations élevées ont été obtenues dans les puits P47 (0,79 mg.L<sup>-1</sup>) et P49 (0,67 mg/L) (Fig.29A). Une différence significative ( $p < 0,05$ ) entre les stations a été notée au niveau des 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements (Annexe 3).



**Figure 29:** Variation saisonnière d'ions ammonium dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. I, II, III et IV= arrondissements

**III.1.2.2.3.4. Orthophosphates des eaux souterraines de la ville de Moundou**

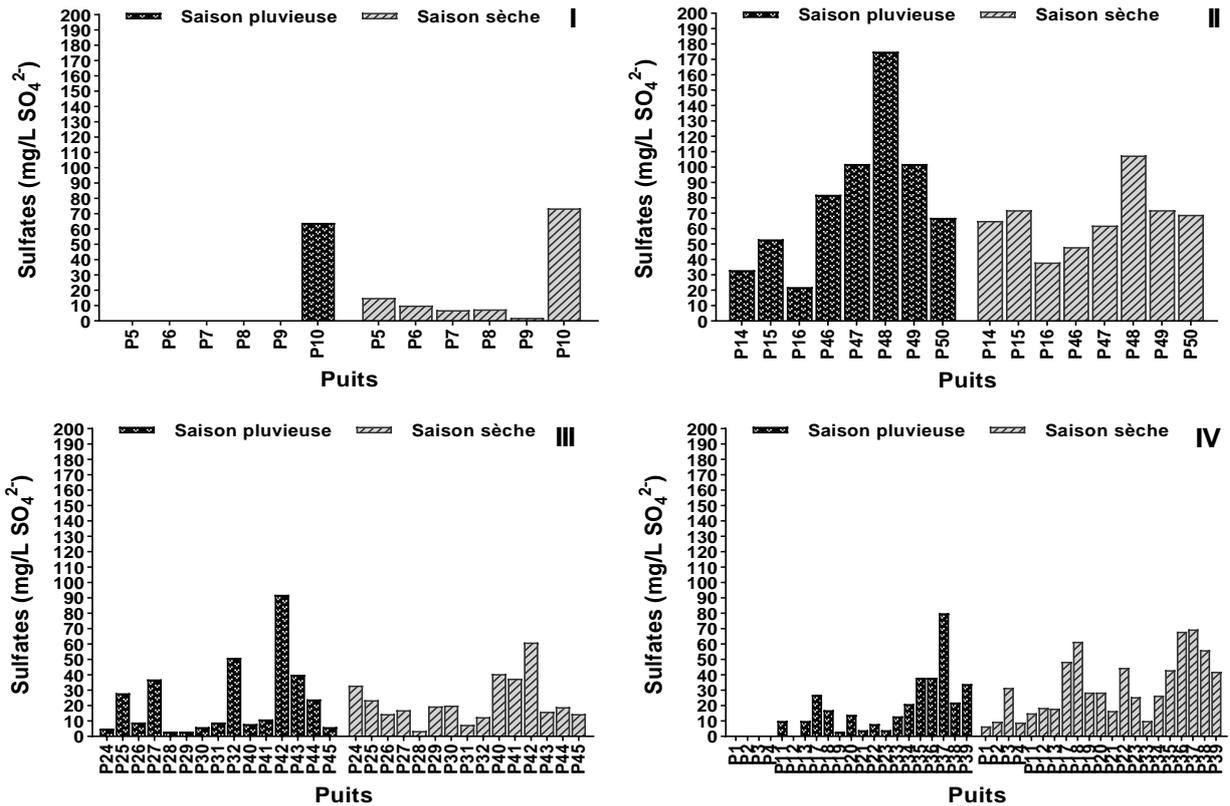
La valeur moyenne de teneurs en orthophosphates dans les eaux étudiées a été 48,19 mg.L<sup>-1</sup> (0,33 mg.L<sup>-1</sup>- 93,06 mg.L<sup>-1</sup>) pendant la saison des pluies et de 75,72 mg.L<sup>-1</sup> (57,05 mg.L<sup>-1</sup> - 110,70 mg.L<sup>-1</sup>) pendant la saison sèche. Dans l'ensemble, les teneurs en orthophosphates dans les eaux des puits étudiés ont été faibles (Fig.30).Une différence significative ( $p < 0,05$ ) entre les stations a été notée au niveau des 1<sup>er</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements (Annexe 3).



**Figure 30:** Variation saisonnière d’orthophosphates dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. I, II, III et IV= arrondissements

**III.1.2.2.3.5. Sulfates des eaux souterraines de la ville de Moundou**

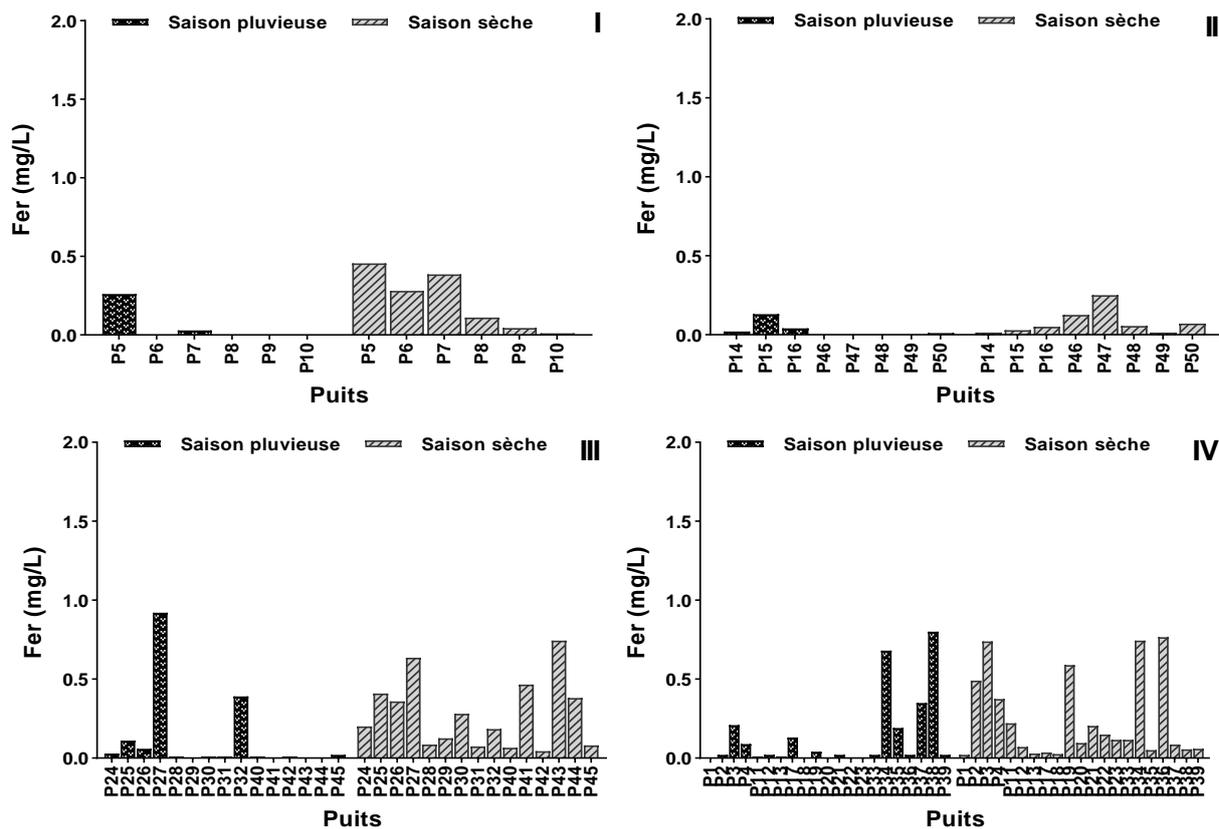
La teneur moyenne de sulfates enregistrée pendant la saison des pluies a été de 36,47 mg.L<sup>-1</sup> (10,67 mg.L<sup>-1</sup> - 79,5 mg.L<sup>-1</sup>) et de 35,18 mg.L<sup>-1</sup> (19,17 mg.L<sup>-1</sup> - 66,69 mg.L<sup>-1</sup>) pendant la saison sèche ; ont été plus importantes que celles qui ont été relevées pendant la saison sèche. Des valeurs élevées en sulfates ont été enregistrées dans les puits P42 (92 mg.L<sup>-1</sup>), P47 et P49 (102 mg.L<sup>-1</sup>) pendant la saison des pluies (Fig.31). Une différence significative (p < 0,05) entre les stations a été notée au niveau des 1<sup>er</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements (Annexe 3).



**Figure 31:** Variation saisonnière de Sulfates dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. I, II, III et IV= arrondissements

### III.1.2.2.3.6. Fer des eaux souterraines de la Ville de Moundou

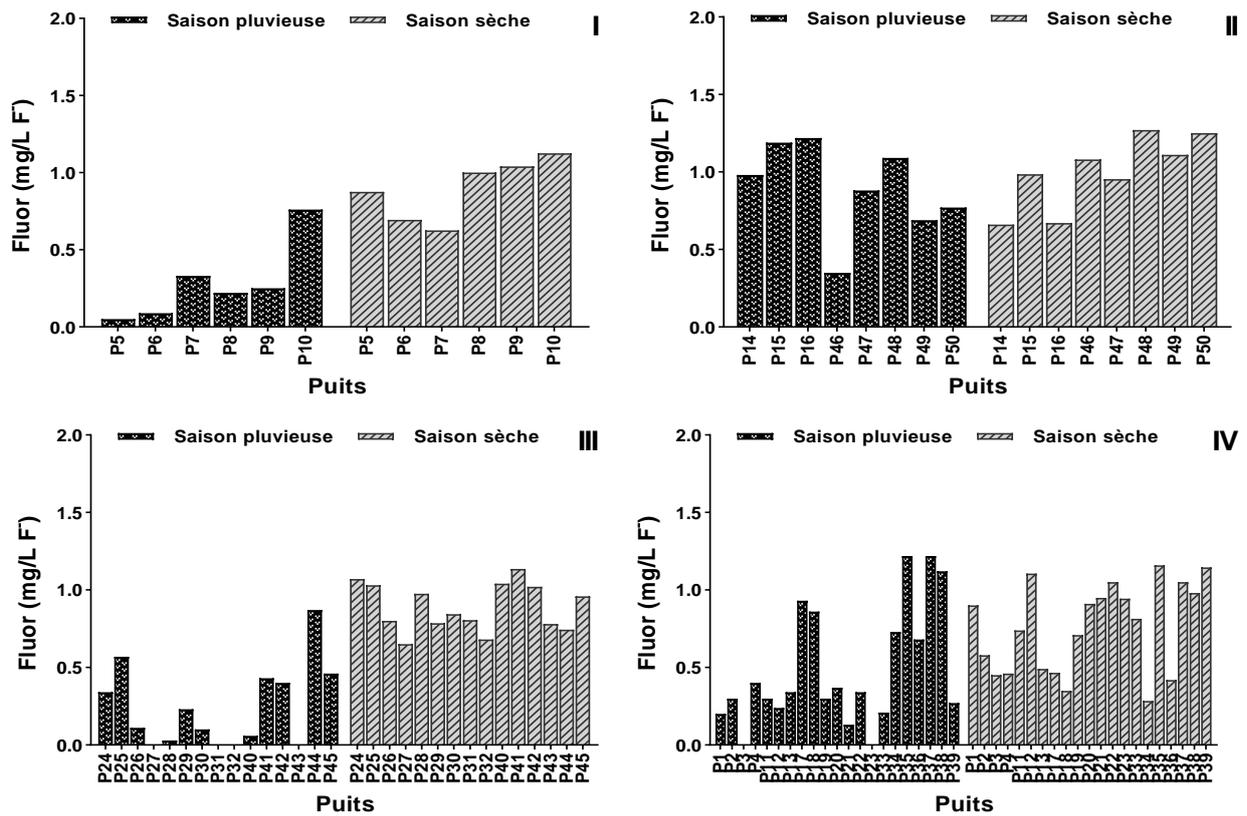
La teneur moyenne en fer a été de 0,07 mg.L<sup>-1</sup> ( 0,03 mg.L<sup>-1</sup> - 0,12 mg.L<sup>-1</sup>) pendant la saison des pluies et de 0,20 mg.L<sup>-1</sup> (0,08 mg.L<sup>-1</sup>- 0,27 mg.L<sup>-1</sup>) pendant la saison sèche. Quelques valeurs élevées de fer ont été enregistrées dans les eaux des puits pendant les deux saisons de la période d'étude (Fig.32). Une différence significative ( $p < 0,05$ ) entre les stations a été notée au niveau des 1<sup>er</sup> et 3<sup>e</sup> arrondissements (Annexe 3).



**Figure 32 :** Variation saisonnière de Fer dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou.  
I, II, III et IV= arrondissements

### III.1.2.2.3.7. Fluor des eaux souterraines de la ville de Moundou

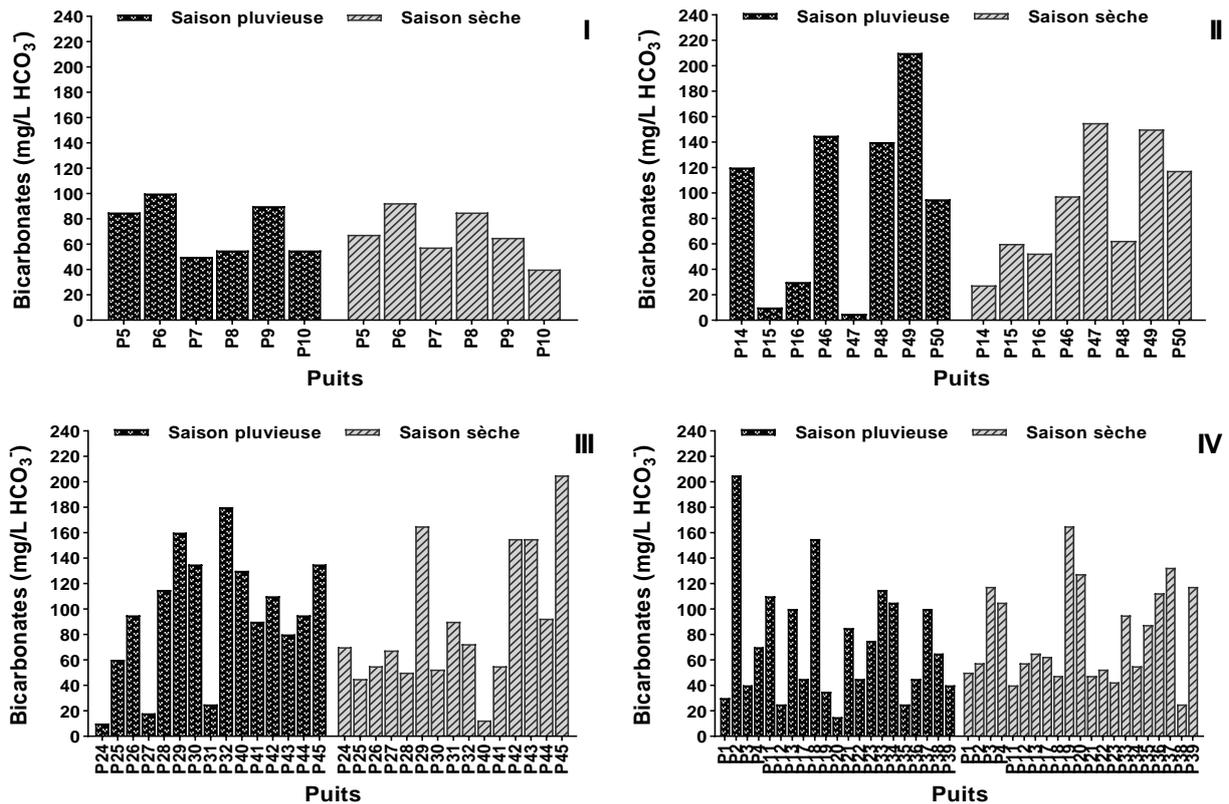
La concentration moyenne d'ions Fluorures dans les puits étudiés a été de  $0,50 \text{ mg.L}^{-1}$  ( $24 \text{ mg.L}^{-1}$  -  $0,89 \text{ mg.L}^{-1}$ ) pendant la saison des pluies et de  $0,91 \text{ mg.L}^{-1}$  ( $0,76 \text{ mg.L}^{-1}$  -  $0,99 \text{ mg.L}^{-1}$ ) pendant la saison sèche. Les valeurs moyennes relativement élevées ont été notées en saison sèche alors que les valeurs faibles ont été enregistrées en saison pluvieuse (Fig.33). Une différence significative ( $p < 0,05$ ) entre les stations a été notée au niveau des 1<sup>er</sup>, 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements (Annexe 3).



**Figure 33:** Variations saisonnière de Fluor dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. I, II, III et IV= arrondissements

### III.1.2.2.3.8. Bicarbonates des eaux souterraines de la ville de Moundou

La valeur moyenne des ions bicarbonates a été  $84 \text{ mg.L}^{-1}$  ( $72,5 \text{ mg.L}^{-1} - 95,87 \text{ mg.L}^{-1}$ ) pendant la saison des pluies et de  $81,73 \text{ mg.L}^{-1}$  ( $67,92 \text{ mg.L}^{-1} - 90,31 \text{ mg.L}^{-1}$ ) pendant la saison sèche. Quelques valeurs élevées ont été enregistrées dans les puits P46 ( $145 \text{ mg.L}^{-1}$ ), P48 ( $140 \text{ mg.L}^{-1}$ ) et P49 ( $210 \text{ mg.L}^{-1}$ ) en saison des pluies et les puits P47 ( $155 \text{ mg.L}^{-1}$ ), P49 ( $150 \text{ mg.L}^{-1}$ ) et P50 ( $117,5 \text{ mg.L}^{-1}$ ) en saison sèche (Fig.34). Aucune différence significative ( $p > 0,05$ ) n'a été notée entre les stations d'une saison à l'autre dans les quatre arrondissements (Annexe 3).



**Figure 34:** Variation saisonnière de Bicarbonates dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou. I, II, III et IV= arrondissements

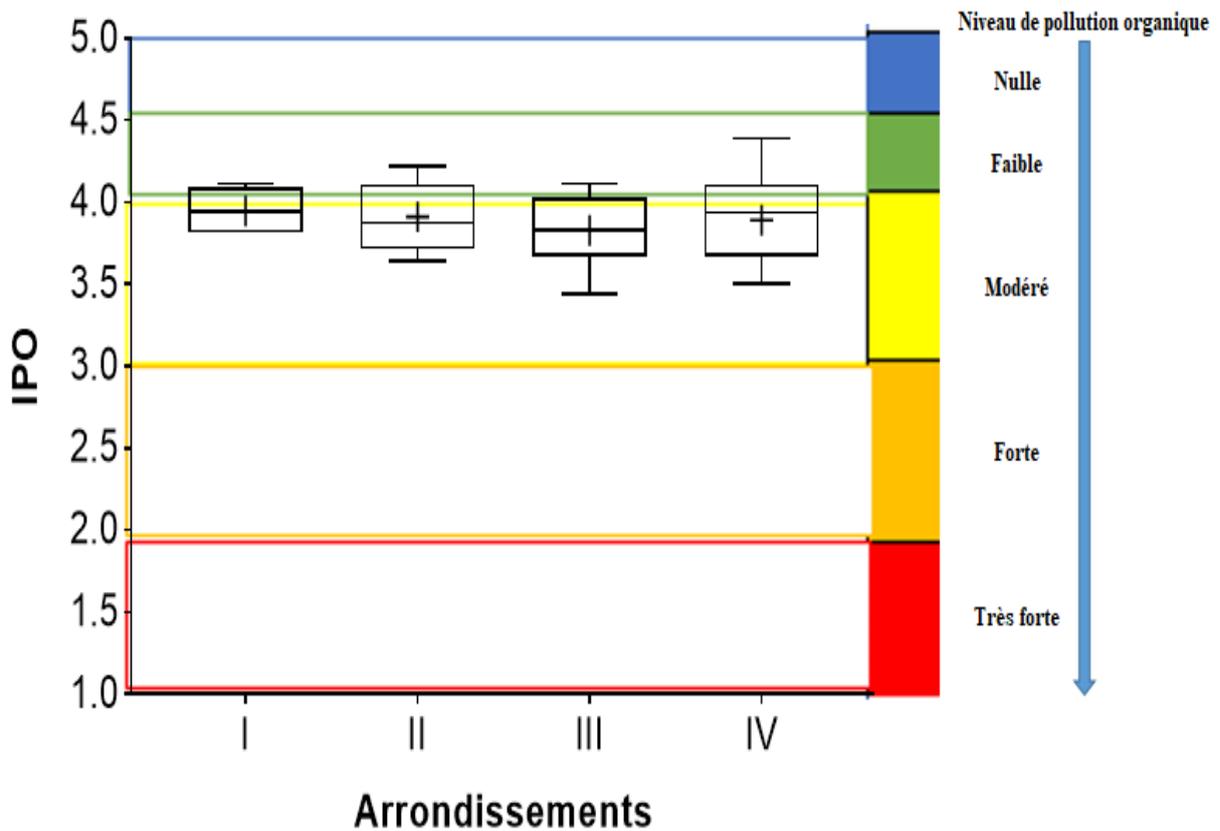
### III.1.2.2.4. Apport de l'Indice de Pollution Organique (IPO) et de l'Indice de Qualité des eaux Souterraines (IQES) dans l'évaluation de la qualité des eaux de puits étudiées

L'impact anthropique sur la qualité des eaux de puits de la province de Moundou a été évaluée par les biais des indices IPO et IQES.

#### III.1.2.2.4.1. Variation spatiale et saisonnière de l'Indice de pollution Organique

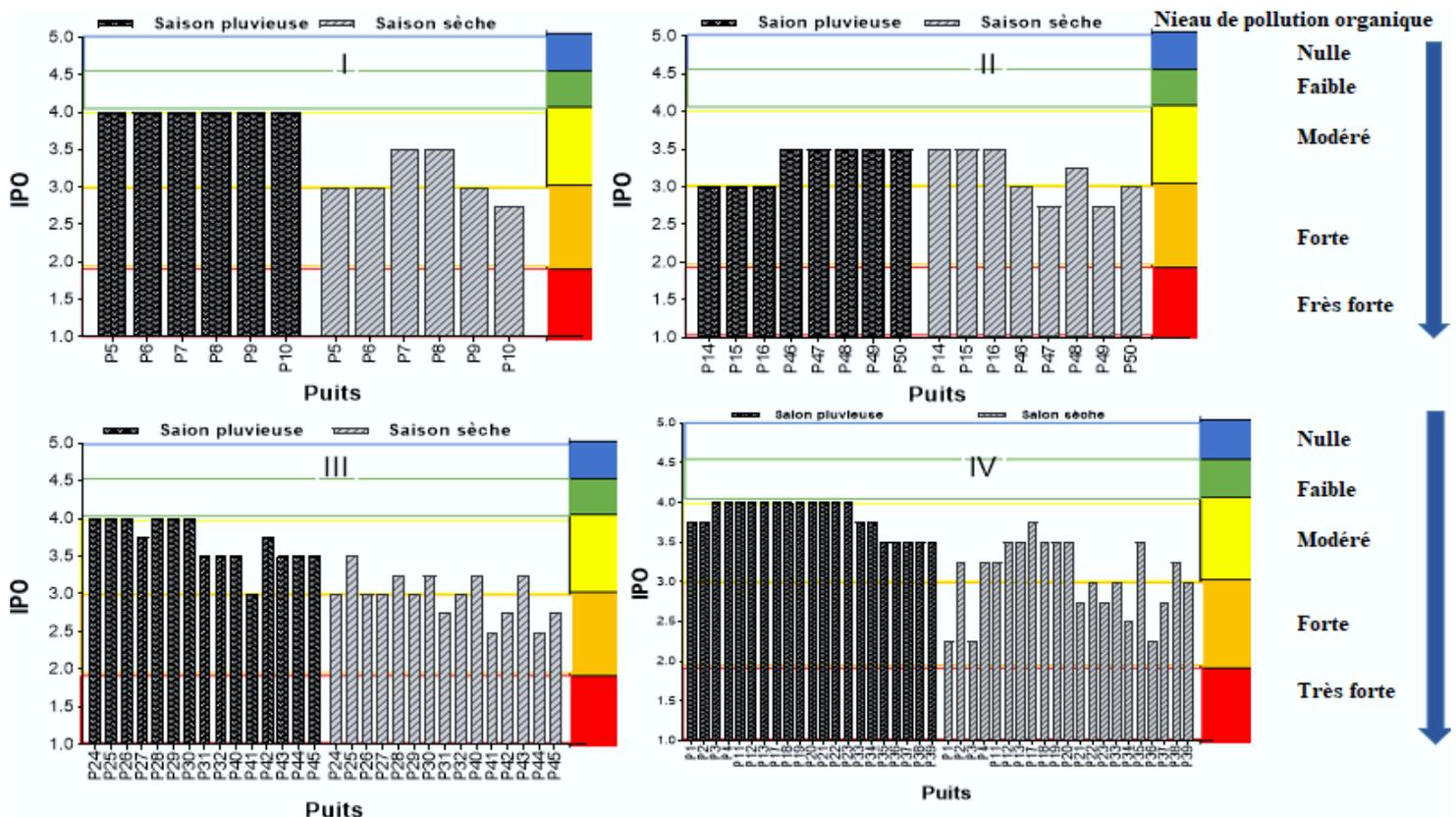
L'IPO a été calculé sur la base des 200 échantillons relatifs aux 50 stations d'échantillonnage. Ces variations spatiales et saisonnières moyennes sont présentées par les figures 35 et 36.

Les valeurs moyennes de l'Indice de Pollution Organique (IPO) ont varié entre 3,44 et 4,39 indiquant une pollution organique faible et surtout modérée des eaux des puits dans la ville de Moundou (Fig.35).



**Figure 35:** Variation spatiale de l'Indice de la pollution Organique dans la ville de Moundou. I, II, III et IV= arrondissements

Lors du suivi des différentes stations, il apparaît que dans la majorité des cas, le niveau moyen de pollution organique des eaux (essentiellement modéré) en saison pluvieuse s'empire (pouvant devenir fort) en saison sèche, excepté d'une part pour les puits P17, P15 et P16 où il tend à s'améliorer et, d'autre part, pour P35 où il reste inchangé ( Fig.36). La classe modérée a été observée dans tous les puits (P5, P6, P7, P8, P9 et P10) pendant la saison des pluies. Alors qu'en saison sèche, les puits P7 et P8 ont montré une classe forte de pollution organique à l'exception des puits P5, P6, P9 et P10 qui ont présenté une classe modérée de pollution organique (Fig.36I). Les classes modérées et fortes ont été enregistrées dans la majorité des puits pendant les deux saisons (Fig.36II, 36II et 36IV).



**Figure 36 :** Variation saisonnière moyenne des valeurs de l'Indice de pollution Organique.

I, II, III et IV= arrondissements

#### III.1.2.2.4.2. Apport de l'Indice de Qualité des Eaux Souterraines (IQES) : cas des eaux de puits

Dans cette étude, pour le calcul de l'indice de qualité de l'eau, nous avons utilisé 17 paramètres analysés ( $T^{\circ}$ , pH, TAC, Turb, CE, TDS, TH,  $DBO_5$ , DCO,  $NO_2^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ ,  $PO_4^{3-}$ ,  $SO_4^-$ , F, Fe,  $HCO_3^-$ ) dans les 50 points d'eaux distribuées dans toute la ville de Moundou.

L'évaluation des eaux des puits de la ville de Moundou par l'IQES a montré que toutes ont été tous influencées par des apports exogènes ( $IQES = 5626,60 > 100$ ) ; ces eaux de puits sont donc impropres à la consommation (Tableau XV).

**Tableau XIV:** Détermination de l'Indice de Qualité des Eaux Souterraines (IQES)

Paramètres	Valeurs standards (Si)	Valeurs Idéal (Vi)	Poids relatif (Wi)	qi	Si = (Wi×Qi)
T°C	20 - 25	25	0,04	115,08	4,60
pH (UC)	6,5 - 8	8	0,125	84,62	10,57
Alcalinité (mg.L <sup>-1</sup> )	9 - 12	12	0,083	314,08	26,06
Turbidité (FTU)	0 - 5	5	0,2	278,4	55,68
Conductivité (µS/Cm)	500 -1400	1400	0,0007	86,06	0,06
TDS (mg.L <sup>-1</sup> )	500 -1000	1000	0,001	60,42	0,006
Dureté totale (mg.L <sup>-1</sup> )	< 20	20	0,05	7510	375,5
DBO <sub>5</sub> (mg.L <sup>-1</sup> )	1 - 5	5	0,2	30,29	6,05
DCO (mg.L <sup>-1</sup> )	20 - 25	25	0,04	2107,68	84,30
Nitrites (mg.L <sup>-1</sup> )	0,1 - 0,3	0,3	3,33	12740	42424
Nitrates (mg.L <sup>-1</sup> )	50	50	0,02	6,08	0,12
Ammonium (mg.L <sup>-1</sup> )	0,1 - 0,5	0,5	2	30	60
Orthophosphates (mg.L <sup>-1</sup> )	0,3 - 0,5	0,5	2	12116	24232
Sulfates (mg.L <sup>-1</sup> )	100 - 250	250	0,004	12,156	0,004
Fluor (mg.L <sup>-1</sup> )	1 - 1,5	1,5	0,66	10	6,6
Fer (mg.L <sup>-1</sup> )	0,2 - 0,3	0,3	3,33	216,66	721,47
Bicarbonates (mg.L <sup>-1</sup> )	200 - 300	300	0,003	27,64	0,08
Total	Somme		12,086	-	68007,1
	<b>IQES</b>		<b>IQES = 5626,60 &gt; 100</b>		

$C_i$  = Concentration en mg. L<sup>-1</sup> de chaque paramètre mesuré ; **IQES** = indice de qualité de l'eau souterraine ;  $q_i$  = qualité de l'eau estimée par rapport au paramètre  $i$  ;  $S_i$  : Valeur normale (OMS, 2011) du paramètre de qualité de l'eau  $i$  ; **SI<sub>i</sub>**, = indice partiel (ou sous-indice), désigne l'indice de qualité pour un paramètre  $i$  ;  $V_i$  est la valeur guide (Ravi *et al.*, 2006) proposée pour les eaux de boisson ;  $W_i$  = est un facteur de pondération.

### III.1.2.2.5. Analyses des caractéristiques physicochimiques des eaux de puits étudiées

#### III.1.2.2.5.1. Corrélations entre les paramètres physicochimiques

Les valeurs de corrélations permettent de retenir les éléments qui sont significativement corrélés ( $p < 0,05$ ) entre eux. Ainsi, on remarque dans les annexes ci-dessous :

#### Annexe 5

- La température de l'eau est corrélée positivement avec les sulfates ( $r = 0,424$ ) et au fluor ( $r = 0,409$ ) mais négativement au fer ( $r = -0,304$ );

- Les Matières en Suspension (MES) par contre sont corrélées positivement à la couleur ( $r = 0,568$ ), à la turbidité ( $r = 0,431$ ) et au fer ( $r = 0,369$ ) mais négativement corrélées au fluor ( $r = 0,346$ );

- La turbidité est fortement corrélée positivement à la couleur ( $r = 0,874$ ) et au fer ( $r = 0,761$ ), à un degré moindre aux nitrites ( $r = 0,377$ ); par contre, elle est négativement corrélée avec la dureté totale ( $r = -0,334$ ) et au fluor ( $r = -0,483$ );

- La couleur négativement corrélée à la conductivité ( $r = -0,314$ ), TDS ( $r = -0,318$ ), TH ( $r = 0,370$ ) et au F ( $r = -0,495$ ) est plutôt corrélée positivement au fer ( $r = 0,727$ );

- La conductivité n'est significativement corrélée qu'aux TDS ( $r = 0,999$ ), la TH ( $r = 0,784$ ), sulfates ( $r = 0,702$ ), fluor ( $r = 0,548$ ) et phosphates ( $r = 0,361$ );

- De même les TDS sont corrélées positivement avec la dureté totale ( $r = 0,786$ ), les phosphates ( $r = 0,356$ ), les sulfates ( $r = 0,694$ ) et le fluor ( $r = 0,542$ );

- Quant à la dureté totale (TH), elle est soit positivement corrélée aux sulfates ( $r = 0,768$ ), fluor ( $r = 0,656$ ), phosphates ( $r = 0,53$ ) et matières organiques ( $r = 0,296$ ), soit négativement corrélée à la DBO<sub>5</sub> ( $r = -0,333$ ). Cette dernière (DBO<sub>5</sub>) est négativement corrélée aux matières organiques ( $r = -0,423$ ), alors que les matières organiques ne sont que positivement corrélées aux sulfates ( $r = 0,369$ ).

- Les nitrites ne sont corrélés que positivement aux nitrates ( $r = 0,509$ ), à l'ammonium ( $r = 0,283$ ), aux phosphates ( $r = 0,356$ ) et au fer ( $r = 0,358$ ). Les nitrates et l'ion ammonium sont positivement corrélés aux phosphores. Ces derniers sont corrélés aux sulfates ( $r = 0,378$ ) et au fluor ( $r = 0,431$ ). Tandis que le fluor est corrélé négativement au fer ( $r = -0,328$ ).

#### Annexe 6

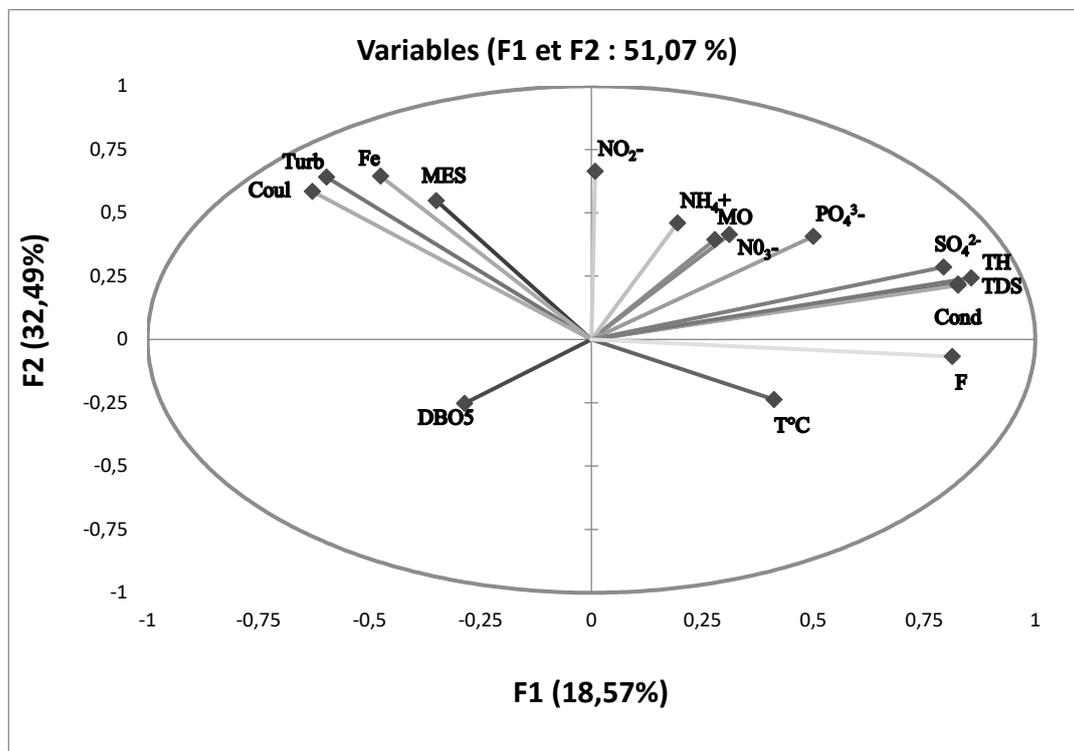
- L'Alt est significativement et positivement liée à distance au latrine ( $r = 0,300$ ) et au Fe ( $r = 0,293$ ) mais négativement à la T°C ( $r = -0,371$ );

- Le NP croît dans le même que Prof ( $r = 0,788$ ). De même que CE et Prof ( $r = 0,775$ ) et SO<sub>4</sub> ( $r = 0,297$ ). Mais Dlat évolue dans le sens contraire que TH ( $r = -0,368$ ) et SO<sub>4</sub> ( $r = -0,303$ ).

#### **III.1.2.2.5.2. Analyse en Composantes Principales (ACP) entres les paramètres étudiés**

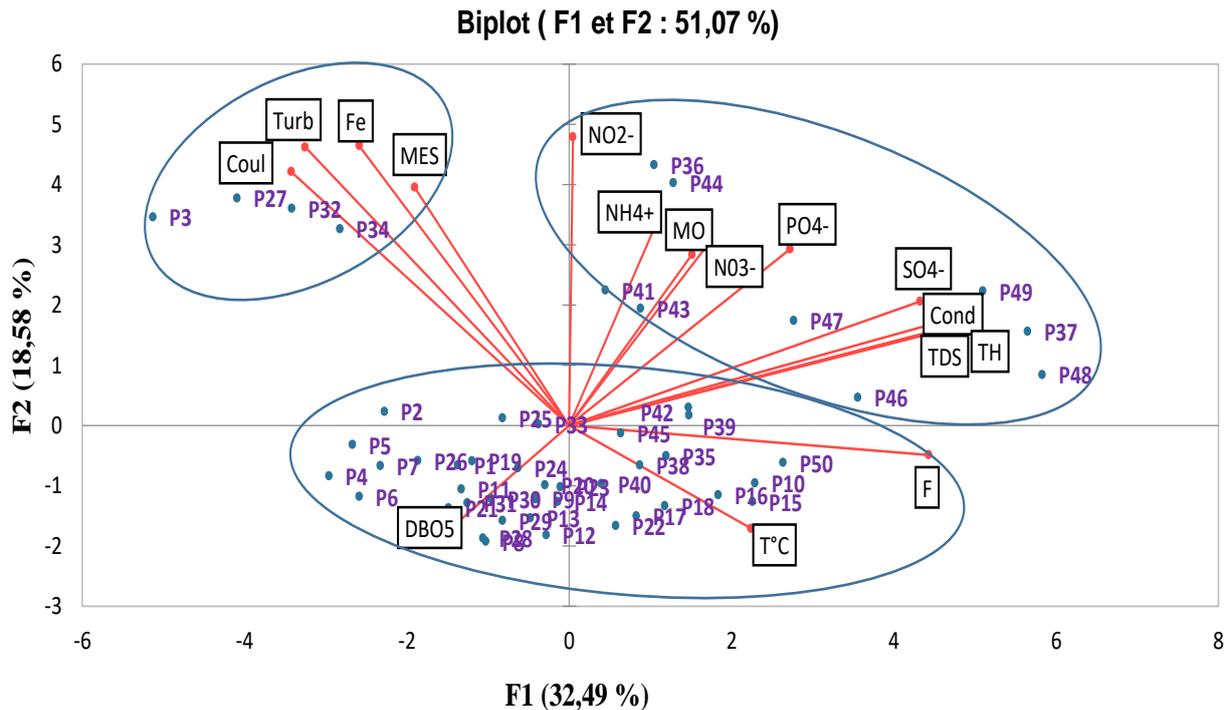
L'ACP a été réalisé sur les données de 16 paramètres de 50 stations. Sur la figure 37, le premier axe principal explique 32,494% de la variation totale et le second 18,577% de cette variance totale. Les deux premiers axes factoriels expliquent 51,07% de variance totale, ce qui traduit une influence moyenne des paramètres physicochimiques sur les eaux souterraines de la ville de Moundou. Onze (11) variables ont une contribution importante à l'explication de l'axe 1 (32,49% de la variance totale): conductivité, fluor, ion ammonium, MO, nitrates, nitrites,

TDS, température, TH, phosphores et sulfates (Fig.37). La couleur, le fer, l'ion ammonium les MES, les nitrates, les nitrites et la Turbidité sont liées à l'axe 2, qui explique 18,57% de la variance totale (Fig.37).



**Figure 37 :** ACP établie sur la base des paramètres physicochimiques étudiés dans la ville de Moundou

Les paramètres (Conductivité, TDS, dureté totale et fluor) renseignent sur le degré de la pollution minérale des eaux et opposent donc les eaux minéralisées aux eaux faiblement ou moins chargées avec les paramètres (Couleur, turbidité, MES et fer). Il se crée un gradient de minéralisation croissant allant du pôle positif vers le pôle négatif de l'axe 1 (Fig.38). Les paramètres (Nitrites, nitrates, ammonium, sulfates, phosphore total et MO) déterminent le degré de pollution organique. On observe un gradient de pollution organique croissant du pôle positif vers le pôle négatif (Fig.38). Il ressort également de la projection des stations sur la base des données physicochimiques que les puits P3, P27, P32 et P34 présentent une faible minéralisation de 8% des stations totales. Les puits P36, P37, P41, P43, P44, P46, P47, P48 et P49 par contre sont très minéralisés avec des valeurs élevées en matières organiques. Dans l'ensemble, 74% des puits sont caractérisés par une forte minéralisation (Fig.38).

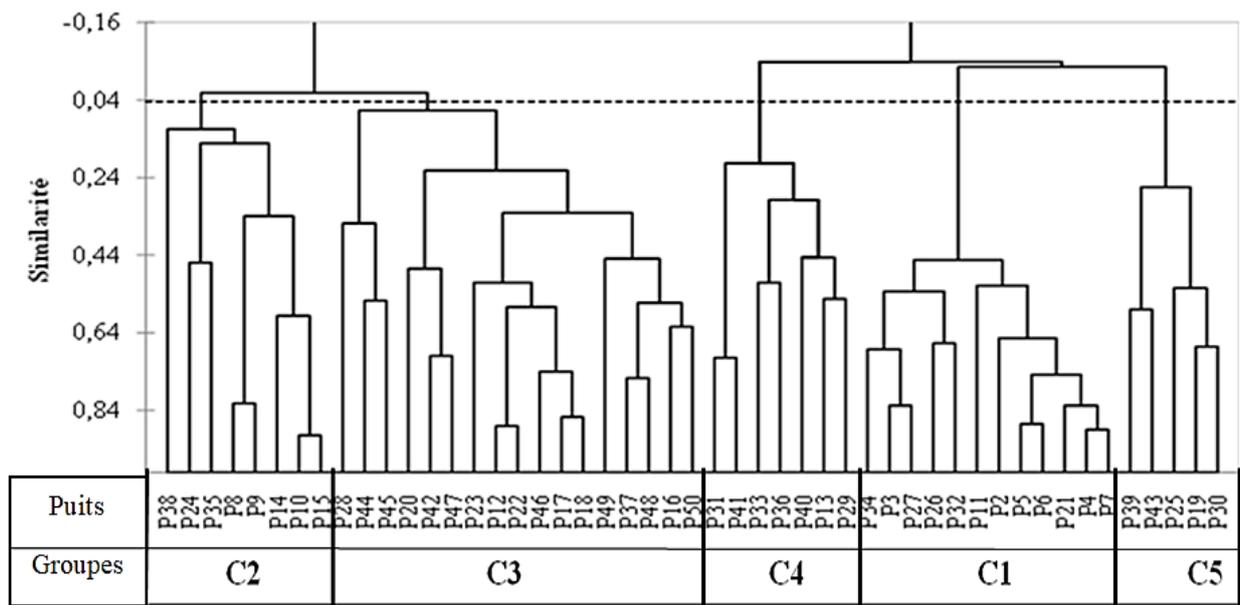


**Figure 38:** Projection des variables et représentation des observations des stations sur le plan factoriel (F1×F2).

### III.1.2.2.5.3. Analyse de la Classification Hiérarchique (ACH) entre les paramètres étudiés

La figure 39 présente le dendrogramme issu de la classification des eaux souterraines de la ville de Moundou sur la base des paramètres physicochimiques. Ce dendrogramme met en évidence cinq groupements.

- **Le groupe C1** est constitué de 12 puits (P2, P3, P4, P5, P6, P7, P11, P21, P26, P27, P32 et P34), les puits riches en couleur, turbidité, Matières En Suspension et DBO<sub>5</sub>, qui indiquent une pollution physique des eaux ;
- **le groupe C2** est formé de 8 puits (P8, P9, P10, P14, P15, P24, P35 et P38), leurs eaux relativement chaudes, riches en Fluor et d'une pollution intermédiaire ;
- **le groupe C3** rassemble 17 puits (P12, P16, P17, P18, P20, P22, P23, P28, P37, P42, P44, P45, P46, P47, P48, P49 et P50) dont les eaux présentent une pollution organique caractérisée par de fortes valeurs de DBO<sub>5</sub>;
- **le groupe C4** est formé de 7 puits (P13, P29, P31, P33, P36, P40 et P41) et le groupe C5 de 5 puits (P19, P25, P30, P39 et P43) ; leurs eaux sont très minéralisées et présentent la pollution organique plus importante. Elles sont aussi caractérisées par la présence des différentes formes d'azotes, en plus des valeurs élevées des phosphates, sulfates, matières organiques, conductivité électrique, Solides Totaux Dissous et dureté totale.



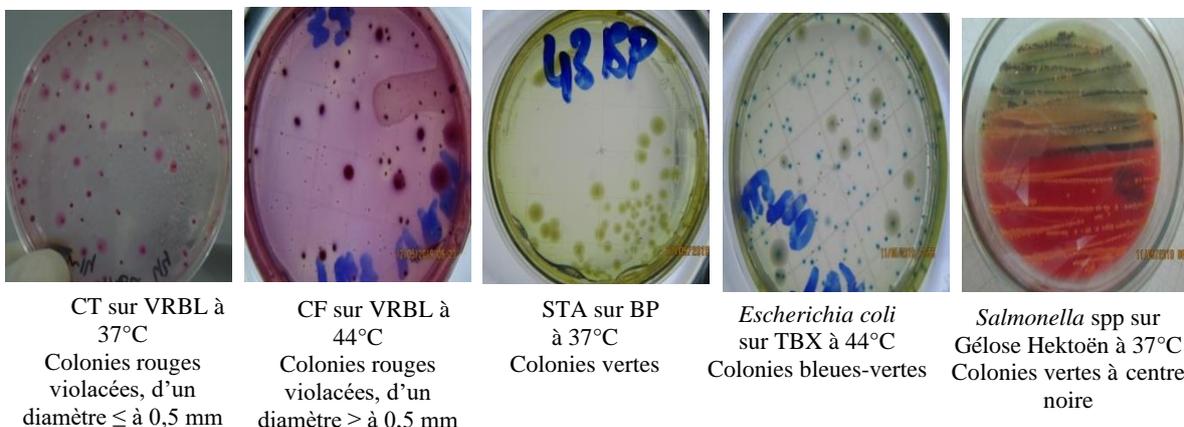
**Figure 39:** Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) des stations sur la base des valeurs des paramètres physique et chimiques

### III.1.3. Caractéristiques bactériologiques des eaux souterraines

Les germes indicateurs de pollution recherchés dans ce travail regroupent de la Flore Mésophile Aérobie Totale (FMAT), les Coliformes Totaux (CT), les Coliformes Fécaux (CF), les *Staphylococcus aureus* (STA) les bactéries *Escherichia coli* (EC) et *Salmonella* spp. (SAL).

#### III.1.3.1. Aspects des colonies des bactéries sur les milieux de culture

La figure 40 présente des colonies de coliformes totaux et coliformes fécaux sur milieu VRBL (Gélose Biliée Lactosée au cristal Vert et au Rouge neutre). Les colonies rouges violacées, d'un diamètre  $\leq$  à 0,5 mm et parfois entourées d'une zone rougeâtre due à la précipitation de la bile sont les prototypes des coliformes totaux. Par contre, les colonies ayant ces mesures caractéristiques mais un diamètre  $\geq$  à 0,5 mm, sont caractéristiques des coliformes fécaux.



**Figure 40 :** Aspects des colonies sur différents types de milieux de culture utilisés.

### III.1.3.2. Profil biochimique des souches isolées

Les souches de *Salmonella spp.* et d'*Escherichia coli* n'ont pu être identifiées que lorsque les réactions suivantes traduites par des virements des couleurs d'un milieu coulé en pente de Kligler ont été obtenues. Après ensemencement du milieu de Kligler coulé en pente, une coloration rouge et un éclat jaune ont été observés (Fig.41A), on a conclu à une absence de fermentation du glucose mais à l'utilisation du lactose. Une colonie noire entre le culot et la pente a également été observé ; il s'agit de la réduction du thiosulfate en présence de citrate ferrique par les souches des salmonelles. Sur la (Fig.41B) par contre, la pente et le culot ont chacun présenté une coloration jaune sans production de gaz ni de sulfate d'hydrogène. Cette coloration jaune prise traduit l'utilisation du glucose et du lactose par voie fermentaire, caractéristique spécifique d'*Escherichia coli* sur milieu Kligler.



**Figure 41:** Culture des souches pures de *Salmonella spp* (A) et des souches pures d'*Escherichia coli* (B) sur milieu Kligler-Hajna.

### III.1.3.3. Répartition des souches de *Salmonella spp.* et d'*Escherichia coli* dans les 4 arrondissements de la ville de Moundou

L'identification sur milieu Kligler-Hajna a permis l'isolement de quatre (04) différentes espèces des germes dans les échantillons d'eaux des puits de la ville de Moundou (Tab. XVI). Dans l'ensemble des échantillons d'eaux, nous avons isolé 38 souches, soit un taux de contamination de 19% (Tab. XVI).

**Tableau XV:** Répartition des souches par arrondissements

N°	Espèces isolées	Nombre d'isolats par arrondissements				
		Nombre des souches isolées sur les 200 d'échantillons d'eaux analysés	Arrondissements			
			I	II	III	IV
1	<i>Salmonella enteritidis</i>	15	2	2	5	6
2	<i>Salmonella paratyphi</i>	4	1	-	2	1
3	<i>Salmonella choleraesuis</i>	7	1	-	2	4
4	<i>Escherichia coli</i>	12	-	1	1	10
<b>Total</b>		<b>38</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>10</b>	<b>21</b>

Dans les quatre (04) arrondissements de Moundou, 26 échantillons d'eaux sur les 200 analysés se sont révélés positifs aux *Salmonella* spp. soit un taux de 13%, 12 échantillons positifs pour *Escherichia coli* soit un taux de 6% (Tab. XVI).

#### III.1.3.4. Évaluation de la qualité bactériologique des eaux de puits

Le tableau XVII nous renseigne que la recherche présomptive a révélé la présence des grands groupes des bactéries recherchés (la Flore Mésophiles aérobies totale, des Coliformes totaux, des Coliformes fécaux, des *Staphylococcus aureus*, des *Salmonella* spp, et *Escherichia coli*) dans les eaux des puits prélevés dans les quatre arrondissements de la ville Moundou.

**Tableau XVI:** Puits ayant des valeurs normales et non conformes de l'abondance bactérienne selon les normes de l'OMS

Germes recherchés	Variation en UFC/mL	Normes de l'OMS, 2011	Puits N=50	% des valeurs satisfaisantes à la norme de l'OMS, 2011	% des valeurs non conformes
<b>Saison pluvieuse</b>					
Flore mésophile totale	27-25.10 <sup>2</sup>	100	27	54	46
Coliformes totaux	0-2.10 <sup>2</sup>	0	1	2	98
Coliformes fécaux	0-1.10 <sup>2</sup>	0	3	6	94
<i>Staphylococcus aureus</i>	0-2.10 <sup>2</sup>	0	16	32	68
<i>Escherichia coli</i>	0-12	0	33	66	34
<i>Salmonella</i> spp.	0-58	0	40	80	20
<b>Saison Sèche</b>					
Flore mésophile totale	90-35.10 <sup>2</sup>	100	2	4	96
Coliformes totaux	0-14.10 <sup>2</sup>	0	1	2	98
Coliformes fécaux	0-5.10 <sup>2</sup>	0	1	2	98
<i>Staphylococcus aureus</i>	8-3.10 <sup>2</sup>	0	0	0	100
<i>Escherichia coli</i>	0-1.10 <sup>2</sup>	0	11	22	78
<i>Salmonella</i> spp.	0-1.10 <sup>2</sup>	0	9	18	82

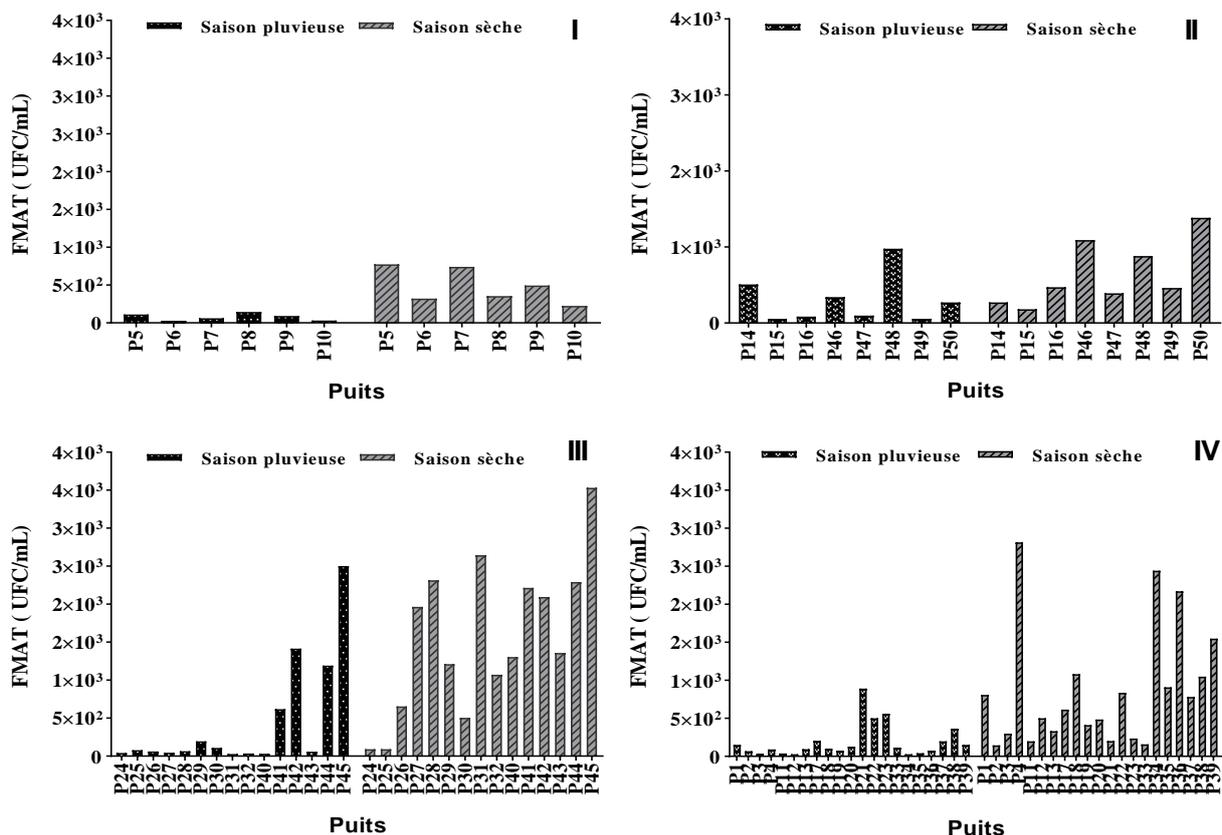
En saison pluvieuse, les eaux des puits ont été modérément contaminées. Les eaux ont été contaminées à 68% par *Staphylococcus aureus*, 20% par *Salmonella* spp. et 34% *Escherichia coli*. 98% et 84% des eaux des puits ont révélé la présence des Coliformes

totaux et fécaux. En saison sèche, la Flore Mésophile aérobie totale, les Coliformes totaux et fécaux, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella* spp. et *Escherichia coli* ont été fréquemment notés aux taux respectifs de 96%, 98% et 98%, 82% et 78%.

### III.1.3.4.1. Variations saisonnières des abondances bactériologiques

#### III.1.3.4.1.1. Flore mésophile aérobie totale (FMAT)

La concentration moyenne de la flore mésophile aérobie totale (FMAT) a été de  $2.10^2$  UFC/mL ( $78$  UFC/mL -  $4.10^2$  UFC/mL) pendant la saison des pluies et de  $8.10^2$  UFC/mL ( $4.10^2$  UFC/mL -  $15.10^2$  UFC/mL) pendant la saison sèche. Les eaux des puits étaient relativement chargées par la FMAT en saison sèche qu'en saison des pluies, exceptées les eaux des puits P14 et P48 (2<sup>e</sup> arrondissement), P21 et P23 (4<sup>e</sup> arrondissement) (Fig.42). Une différence significative ( $p < 0,05$ ) a été notée entre les stations d'une saison à l'autre dans les 1<sup>er</sup>, 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements (Annexe 3).

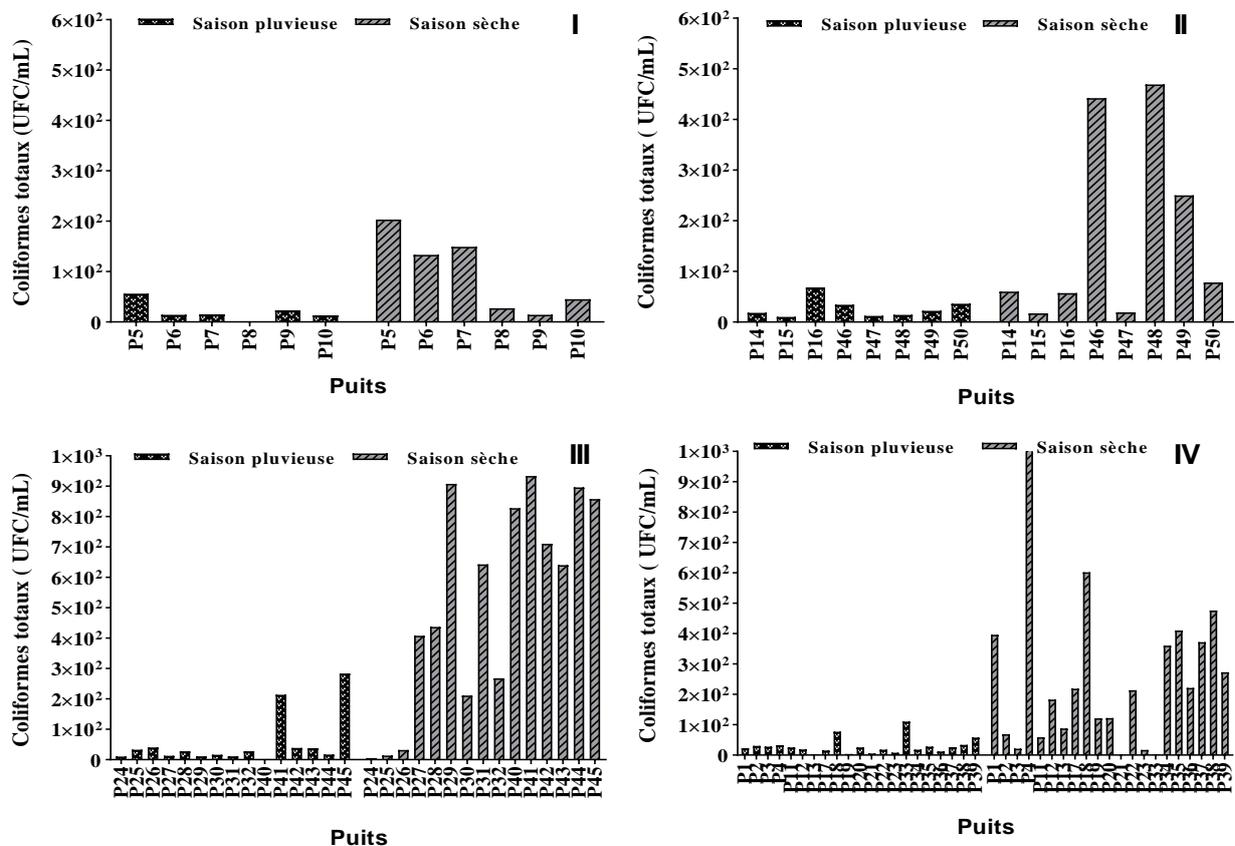


**Figure 42** : Variation saisonnière de l'abondance de la Flore mésophile totale dans les eaux des puits des quatre arrondissements de la ville de Moundou au cours de l'étude.

I, II, III et IV = Arrondissements

### III.1.3.4.1.2. Coliformes totaux (CT)

La concentration moyenne en coliformes totaux dans les puits étudiés a été de 31UFC/mL (20 UFC/mL - 52 UFC/mL) pendant la saison des pluies et de  $2.10^2$  UFC/mL (95 UFC/mL -  $5.10^2$  UFC/mL) pendant la saison sèche. Comme les FMAT, les coliformes totaux étaient moins abondants dans les eaux des puits pendant la saison des pluies qu'en saison sèche ; sauf dans les puits P25 et P26 (3<sup>e</sup> arrondissement), P3 et P33 (4<sup>e</sup> arrondissement) (Fig.43). 800 et plus UFC/mL de coliformes totaux ont été relevées dans les puits P29, P41 et P44 et P45 en saison sèche (Fig.43). Une différence significative ( $p < 0,05$ ) a été notée entre les stations d'une saison à l'autre dans les 1<sup>er</sup>, 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements (Annexe 3).



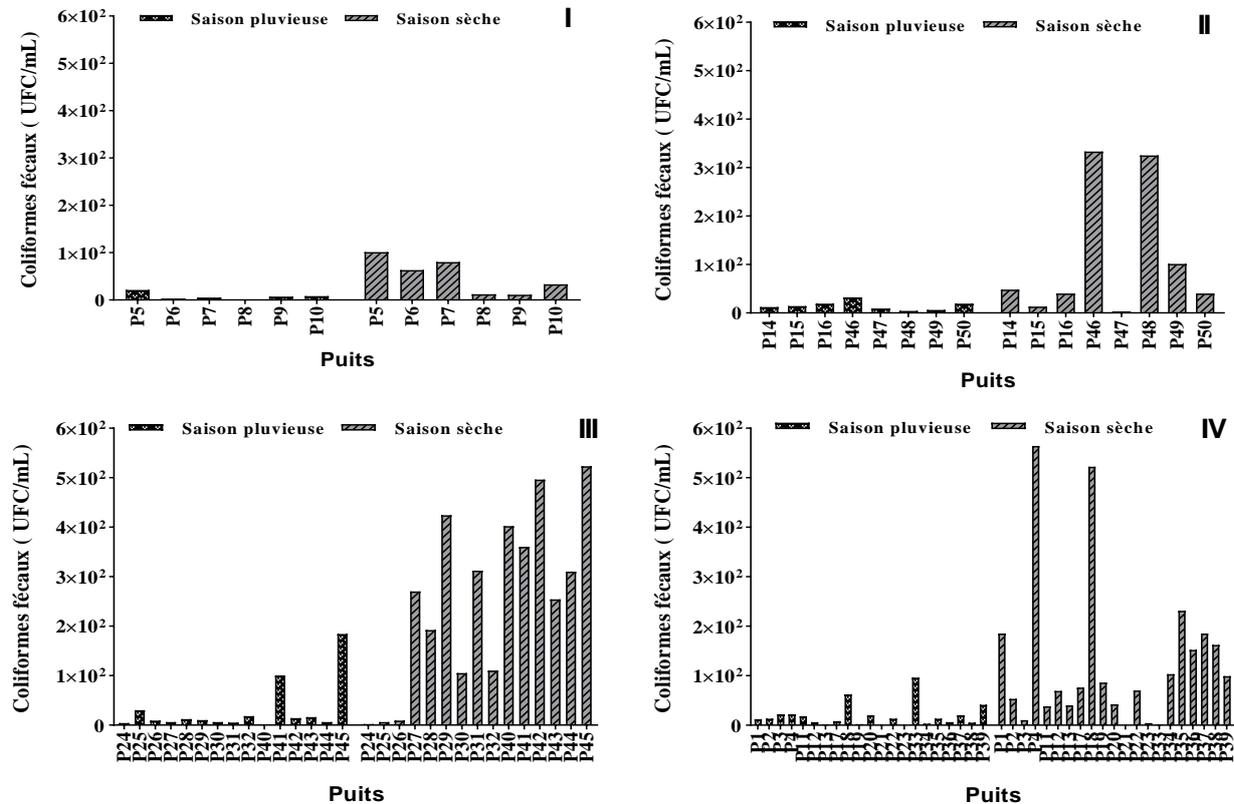
**Figure 43:** Variation saisonnière de l'abondance des Coliforme totaux dans les eaux de puits des quatre arrondissements de la ville de Moundou au cours de l'étude.

I, II, III et IV = Arrondissements

### III.1.3.4.1.3. Coliformes fécaux (CF)

La concentration moyenne des eaux en coliformes fécaux a été de 16 UFC/mL (7 UFC/mL - 28 UFC/mL) enregistrée en saison des pluies et une concentration moyenne de 135 UFC/mL (50 UFC/mL -  $2.10^2$  UFC/mL) enregistrée en saison sèche. Les eaux des puits étaient plus chargées en coliformes fécaux en saison pluvieuse qu'en saison sèche, excepté les P47 et P3 respectivement du 2<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements (Fig.44). Une différence significative ( $p < 0,05$ )

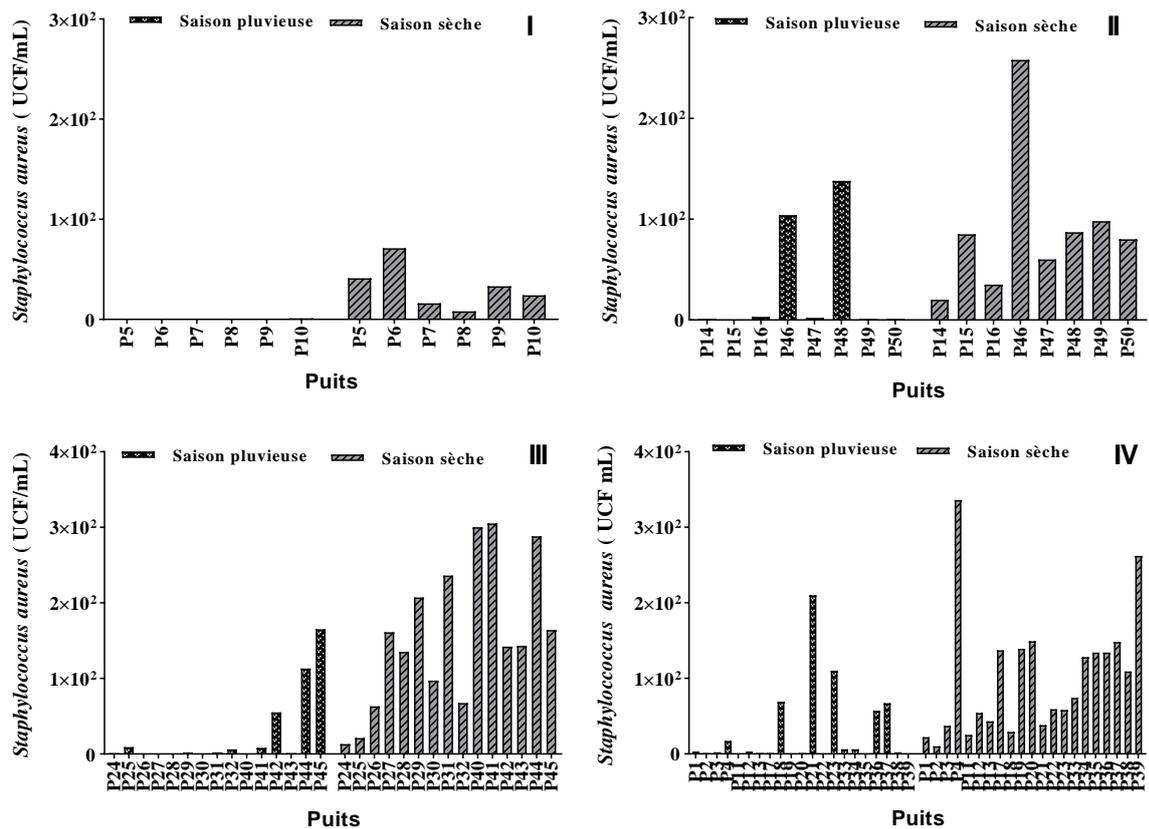
a été notée entre les stations d'une saison à l'autre dans les 1<sup>er</sup>, 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements (Annexe 3).



**Figure 44:** Variation saisonnière de l'abondance des Coliforme fécaux dans les eaux de puits des quatre arrondissements la ville de Moundou au cours de l'étude.  
I, II, III et IV = Arrondissements

#### III.1.3.4.1.4. *Staphylococcus aureus* (STA)

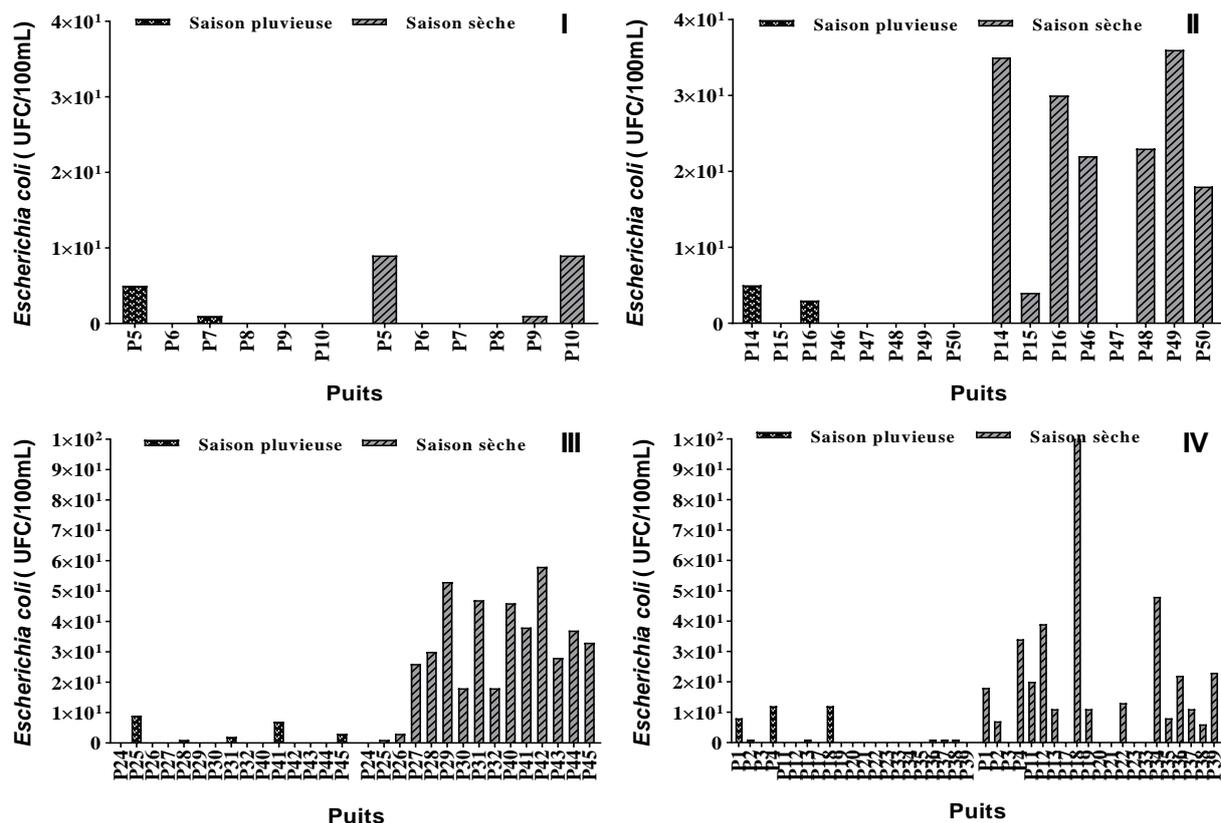
La concentration moyenne des *Staphylococcus aureus* (STA), a été de 20 UFC/mL (0 UFC/MI - 31 UFC/mL) enregistrée en saison des pluies et une moyenne de 94 UFC/mL (32 UFC/mL - 156 UFC/mL) enregistrée en saison sèche. L'analyse bactériologique des eaux a révélé que la totalité des puits était contaminée par *Staphylococcus aureus* pendant la saison sèche (Fig.45). Les valeurs relativement élevées de l'abondance de *Staphylococcus aureus* mis a été enregistrées dans les eaux des puits P48 (2<sup>e</sup> arrondissement) ; P45 (3<sup>e</sup> arrondissement), P18, P21 et P23 (4<sup>e</sup> arrondissement) (Fig.45). Une différence significative ( $p < 0,05$ ) a été notée entre les stations d'une saison à l'autre dans les 1<sup>er</sup>, 2<sup>e</sup>, 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements (Annexe 3).



**Figure 45:** Variation saisonnière de l'abondance des *Staphylococcus aureus* dans les eaux de puits des quatre arrondissements de la ville de Moundou au cours de l'étude.  
I, II, III et IV = Arrondissements

**III.1.3.4.1.5. *Escherichia coli* (EC)**

La densité moyenne d'*Escherichia coli* a été de 1 UFC/100mL (1UFC/100mL - 2 UFC/100mL) enregistrée en saison des pluies et une moyenne de 18 UFC/100mL (3UFC/100mL - 29 UFC/100mL) enregistrée en saison sèche. Les valeurs relativement élevées d'*Escherichia coli* ont été notées dans les eaux des puits P7 (1<sup>er</sup> arrondissement) et P25 (3<sup>e</sup> arrondissement) (Fig.46). Une différence significative ( $p < 0,05$ ) a été notée entre les stations d'une saison à l'autre dans les 2<sup>e</sup>, 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements (Annexe 3).

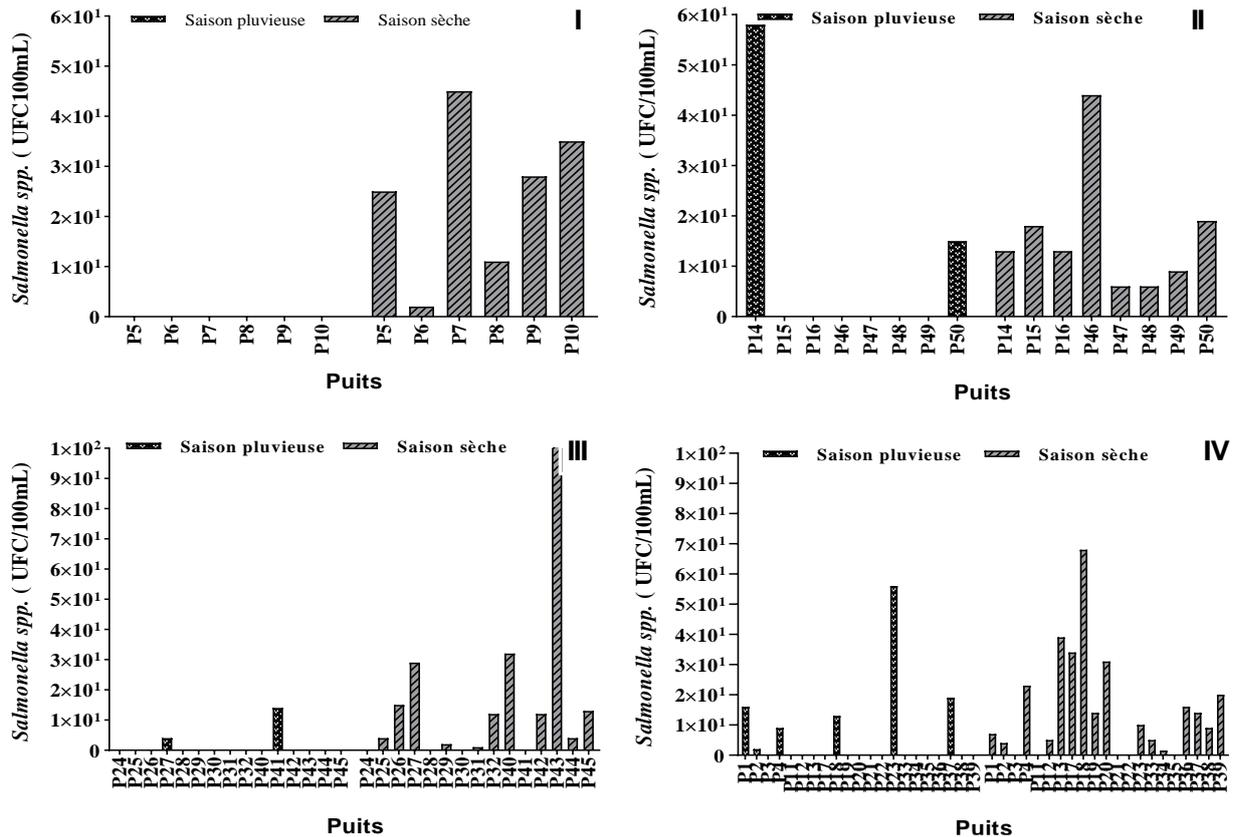


**Figure 46 :** Variation saisonnière de l’abondance d’*Escherichia coli* dans les eaux de puits des quatre arrondissements la ville de Moundou au cours de l’étude.

I, II, III et IV = Arrondissements

### III.1.3.4.1.6. *Salmonella* spp. (SAL)

La charge bactérienne moyenne en *Salmonella* spp. a été de 4UFC/100mL (0 UFC/100mL- 9 UFC/100mL) en saison pluvieuse et de 17 UFC/100mL (16 UFC/100mL - 24 UFC/100mL) dans en saison sèche. Les valeurs élevées de l’abondance bactérienne *Salmonella* spp. Ont été relevées dans les eaux des puits P41 (3<sup>e</sup> arrondissement), P1, P23 et P37 (4<sup>e</sup> arrondissement) (Fig.47). Une différence significative ( $p < 0,05$ ) a été notée entre les stations d’une saison à l’autre dans le 1<sup>er</sup> arrondissement (Annexe 3).



**Figure 47:** Variation saisonnière de l'abondance de *Salmonella* spp. dans les eaux de puits des quatre arrondissements de la ville de Moundou au cours de l'étude.  
I, II, III et IV = Arrondissements

### III.1.3.5. Profil saisonnier de résistance aux antibiotiques des souches de *Salmonella* spp. et d'*Escherichia coli*

Les niveaux de résistances bactériennes n'ont pas été similaires entre les deux saisons.

#### III.1.3.5.1. Pendant la saison des pluies

Il ressort dans l'ensemble un niveau élevé de résistance aux bêta-lactamines. Les taux de résistance les plus élevés ont été observés vis-à-vis de Ceftriaxone soit 100% pour *Escherichia coli* et (87,5%) pour *Salmonella* spp.; l'Ampiciline soit 77,7% pour *Escherichia coli* et 75% pour *Salmonella* spp.; l'Amoxicilline + l'acide clavulanique soit 55,5% pour *Escherichia coli* et 50% pour *Salmonella* spp. (Tab.XVIII). Les molécules d'antibiotiques les moins actives ont été: l'Oxytétracycline (11,1%) pour *Escherichia coli*, la Tobramycine (33,3%) pour *Escherichia coli* et (25%) pour *Salmonella* spp., l'Érythromycine respectivement (11,11%) pour *Escherichia coli* (Tab.XVIII). Concernant les Tétracyclines, le taux de résistance à l'Oxytétracycline a été de et résistance intermédiaire de 50% pour *Salmonella* spp. Le taux de résistance à l'Erythromycine a été de 11,1% et intermédiaire de 50% pour *Salmonella* spp. (TAB. XVIII). De valeurs élevées ont été notées avec les Tétracyclines notamment pour

*Escherichia coli* 33,3% et 33,7% pour *Salmonella* spp. à l'Oxytétracycline. Il faut noter qu'aucune résistance n'a été observée à la Gentamicine pour les deux germes pendant la saison des pluies.

**Tableau XVII:** Résistance des souches de *Salmonella* spp. et d'*Escherichia coli* aux antibiotiques pendant la saison des pluies.

Disques d'antibiotiques testés	<i>Escherichia coli</i> (9)			<i>Salmonella</i> spp (8)		
	S(%)	R(%)	I(%)	S(%)	R(%)	I (%)
Amoxicilline 30 µg (AX)	0	<b>22,2</b>	0	0	<b>37,5</b>	0
Amoxicilline+ac.clav ( 20/10) µg (AMC)	0	<b>55,5</b>	0	0	<b>50</b>	0
Amoxicilline+Sulbactam 20 µg (AMS)	0	<b>33,3</b>	0	0	<b>50</b>	0
Ampicilline 20 µg (AMP)	0	<b>77,7</b>	0	0	<b>75</b>	0
Ceftriaxone 30µg (CRO)	0	<b>100</b>	0	0	<b>87,5</b>	0
Oxytétracycline 30 µg (OT)	33,3	11,1	<b>44,4</b>	37,5	0	<b>50</b>
Gentamicine 10µg (GEN)	55,5	0	0	62,5	0	0
Tobramycine 10µg (TMN)	0	0	<b>33,3</b>	0	0	<b>25</b>
Erythromycine 15 µg (ERY)	66,6	<b>11,1</b>	<b>11,1</b>	50	0	<b>37,5</b>

S: sensible; I: intermédiaire; R: résistant

### III.1.3.5.2. Pendant la saison sèche

Pendant la saison sèche, un niveau de résistance bactérienne très élevé a également été noté vis-à-vis des bêta-lactamines. Elle a été de 100% à l'ampicilline, 66,6% à la l'Amoxicilline + acide clavulanique et 33,3% à Amoxicilline sulbatans pour *Escherichia coli*. Par contre cette résistance s'est élevée à 88,8% à la Ceftriaxone, 50% à l'Amoxicilline et à l'Ampicilline, 38,8% à la l'Amoxicilline + acide clavulanique, et 33,3% à l'Amoxicilline + Sulbactam pour *Salmonella* spp. (Tab.XIX). Cependant, aucune résistance n'a été observée vis-à-vis de la Gentamicine et de l'Erythromycine. Un taux de résistance intermédiaire assez élevé (66,6%) a été trouvé vis-à-vis de l'Oxytétracycline mais il était relativement faible (33,3%) à la Tobramycine pour *Escherichia coli*. Les germes de *Salmonella* spp. ont présenté des niveaux de résistance (1) relativement bas soit 33,3% à l'Erythromycine, 27,7% l'Oxytétracycline, et (2) moyen de 50% à la Tobramycine (Tab.XIX). Une fois de plus, *Escherichia coli* et *Salmonella* spp. n'ont pas résisté à la Gentamicine pendant la saison sèche (Tab.XIX). Pendant les deux saisons, les souches d'*E. coli* ont présenté une prévalence de résistantes de 77,77% et de 64,27% pour *Salmonella* spp. soit une prévalence globale de résistance (71%).

**Tableau XVIII:** Résistance des souches de *Salmonella* spp et d'*Escherichia coli* aux antibiotiques pendant la saison sèche.

Disques d'antibiotiques testés	<i>Escherichia coli</i> (3)			<i>Salmonella</i> spp (18)		
	S(%)	R(%)	I(%)	S(%)	R(%)	I(%)
Amoxicilline 30 µg (AX)	0	0	0	0	50	5,5
Amoxicilline+ac.clav ( 20/10) µg (AMC)	0	66,6	0	11,1	38,8	0
Amoxicilline+Sulbactam 20 µg (AMS)	0	33,3	0	0	33,3	0
Ampiciline 20 µg (AMP)	0	100	0	0	50	0
Ceftriaxone 30µg (CRO)	0	66,6	0	0	88,8	0
Oxytétracycline 30 µg (OT)	0	0	66,6	44,4	27,7	11,1
Gentamicine 10µg (GEN)	66,6	0	0	50	0	0
Tobramycine 10µg (TMN)	0	0	33,3	0	5,5	50
Erythromycine 15 µg (ERY)	66,6	0	0	27,7	33,3	22,2

S: sensible; I: intermédiaire; R: résistant

### III.1.3.6. Analyses multivariées présentant les caractéristiques physicochimiques des eaux de puits étudiées

#### III.1.3.6.1. Corrélations entre les paramètres morphohydrologiques, physicochimiques et bactériologiques

##### Annexe 7

Hormis la situation où l'abondance de EC est négativement corrélée à Dtre ( $r = -0,330$ ), des corrélations significatives et positives ont obtenues entre :

- NP et CT ( $r = 0,324$ ), CF ( $r = 0,372$ ), EC ( $r = 0,312$ ), ST ( $r = 0,352$ ) ;
- Hmarg et EC ( $r = 0,527$ ) ;

De plus, plusieurs groupes bactériens ont été positivement corrélés. C'était le cas de :

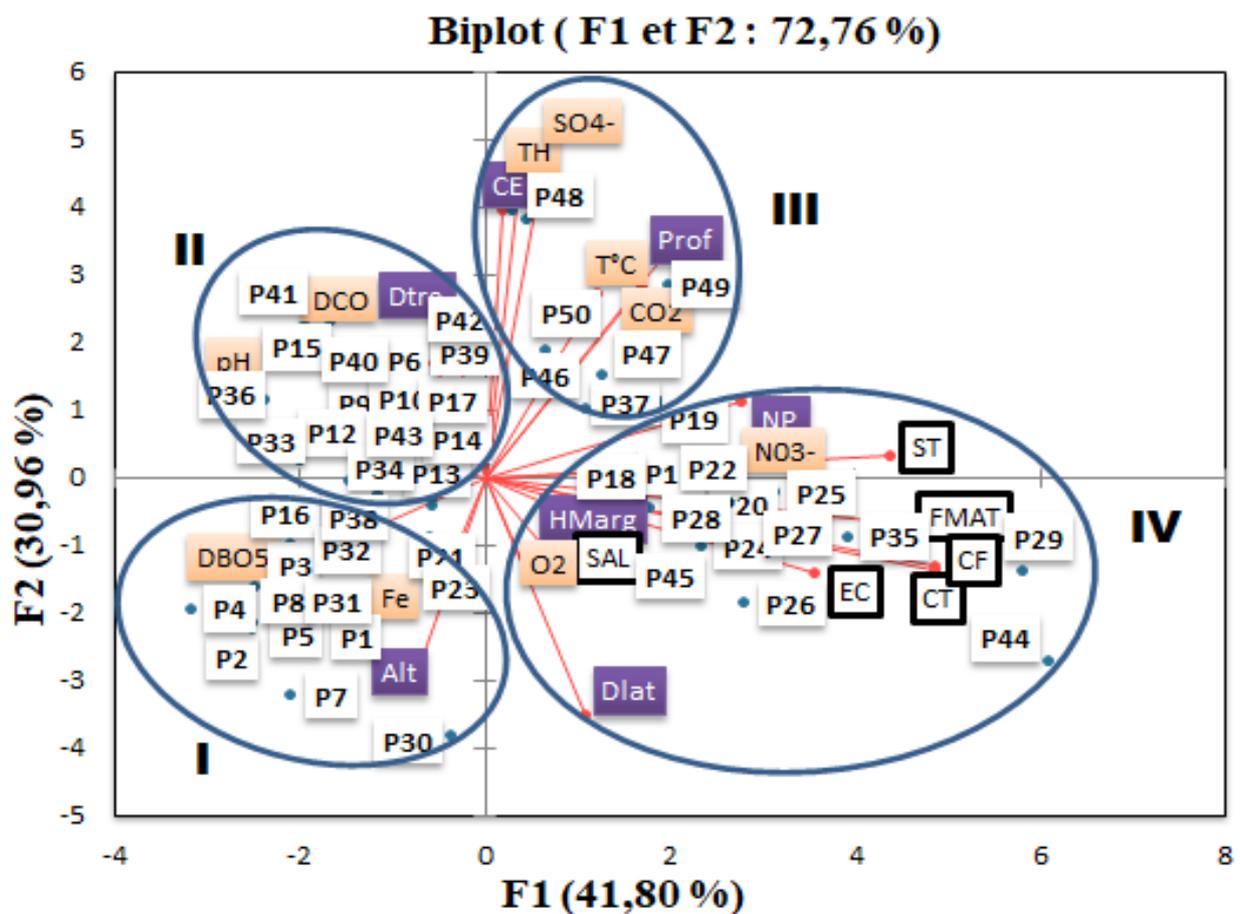
- FMAT et CT ( $r = 0,776$ ), CF ( $r = 0,768$ ), ST ( $r = 0,719$ ) et moyennement EC ( $r = 0,447$ ) ;
- CT et CF ( $r = 0,929$ ), ST ( $r = 0,755$ ) et EC ( $r = 0,616$ );
- CF et EC ( $r = 0,710$ ), ST( $r = 0,702$ ) ;
- EC et STA ( $r = 0,330$ ).

##### Annexe 8

- $DBO_5$  a été négativement à FMAT ( $r = -0,286$ ), CT ( $r = -0,329$ ) et ST ( $r = -0,286$ ) ;
- $NO_3^-$  ont été positivement corrélés à CT ( $r = 0,351$ ) et ST ( $r = 0,369$ ).

### III.1.3.6.2. Analyse en Composantes Principales (ACP) des données morphohydrométriques, physico-chimiques et bactériologiques

La Figure 48 présente la distribution des 50 stations d'échantillonnage, relativement à leurs caractéristiques hydromorphométriques, bactériologiques et physicochimiques en 4 groupes ; les deux premiers groupes rassemblent 30 puits situés un peu loin du centre - ville; ils fournissent des eaux légèrement polluées, faiblement chargées en matières organiques dissoutes ou particulaires, et en bactéries. Le groupe III est formé de 6 puits situés au centre-ville ; ils sont également caractérisés par une forte minéralisation des eaux, des fortes charges en matières organiques dissoutes, des eaux très dures et plus riches en ions sulfates que celles des stations du premier groupe avec une pollution organique très forte. Le groupe IV contient 14 puits, majoritairement localisés dans la zone agricole et au centre de la ville ; leurs eaux sont très polluées et de mauvaise qualité en raison de l'abondance des germes indicateurs de pollution bactériologique. Leurs eaux présentent donc un risque sérieux pour la santé des populations qui les consomment (Fig.48).



**Figure 48** : Projection des variables morphohydrométriques, physico-chimiques, bactériologiques et représentation des observations des stations sur le plan factoriel (F1×F2).

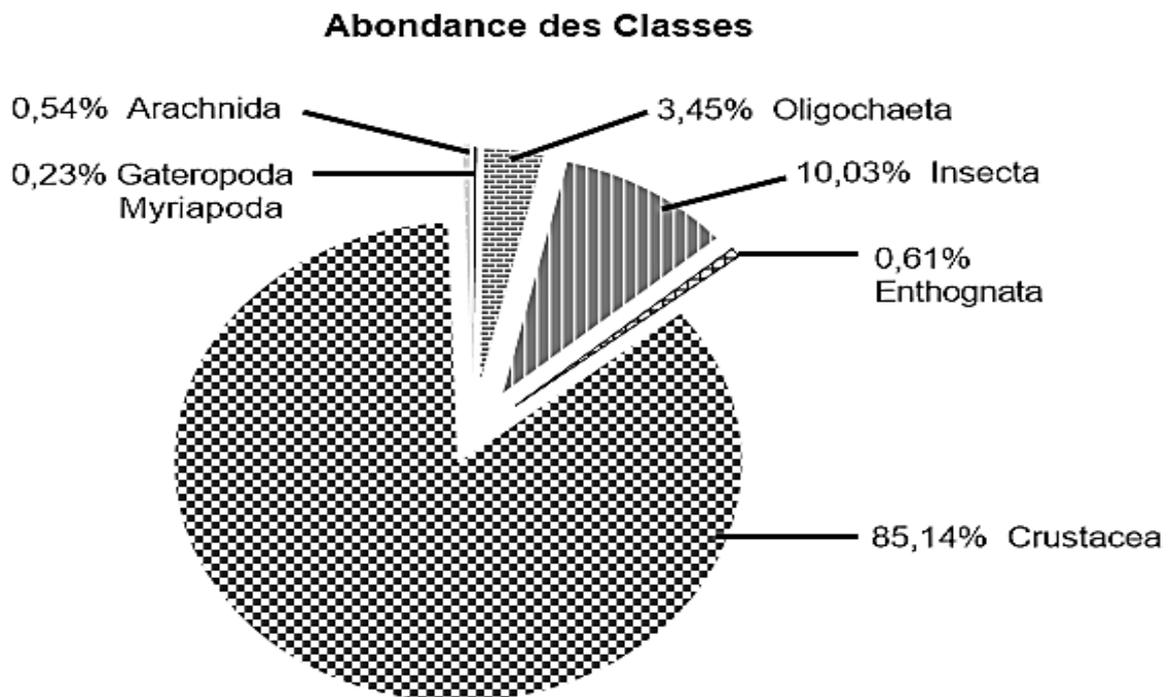
### III.1.4. Diversité stygobiologique des eaux souterraines

Les résultats de l'étude taxonomique de l'ensemble du matériel récolté montrent une richesse faunistique indéniable dans les eaux souterraines du Tchad. La plupart des espèces sont soit strictement stygoxènes, soit stygophiles (annexes 9, 10, 11 et 12). Les espèces stygobies du genre *Metastenasellus* ont retenu notre attention pour une étude poussée.

#### III.1.4.1. Richesse taxonomique des eaux

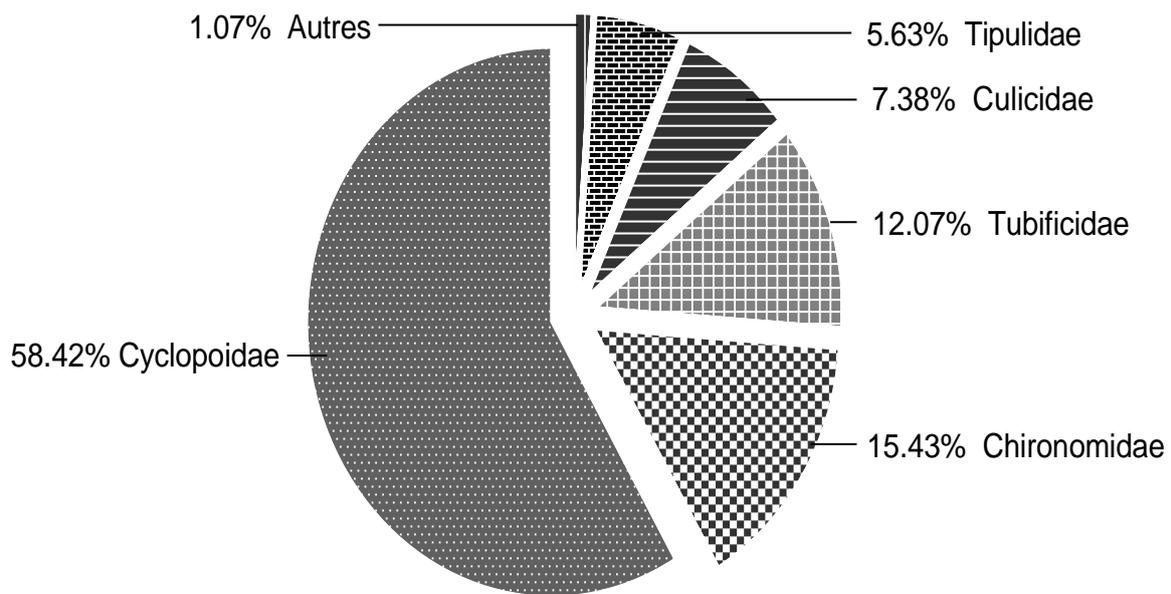
##### III.1.4.1.1. Inventaire faunistique des stations

Au total 33388 organismes correspondant à 91 morphotypes ont été récoltés et identifiés au rang de la famille. Ces taxa se répartissent dans 3 embranchements (Arthropodes, Mollusques, Annélides), 7 classes (Arachnida, Crustacea, Enthognata, Insecta, Oligochaeta, Gasteropoda et Myriapoda) avec une domination de la classe des crustacées et des insectes (Fig.49).



**Figure 49:** Distribution des différentes classes d'invertébrés récoltés dans les puits échantillonnés au cours de l'étude dans la ville de Moundou

Des 91 familles inventoriées au cours de cette étude, les Cypridae, Cyclopidae, Asellidae (Crustacés), les Isothomidae, Sminthuridae, Poduridae (Collemboles), les Dytiscidae, Hydraenidae, hydrophylidae (Coléoptère), les (Culicidae, Anophelidae, Tipulidae, Chironomidae, Rhagionidae (Diptères) ont été les plus abondants (Fig.50).

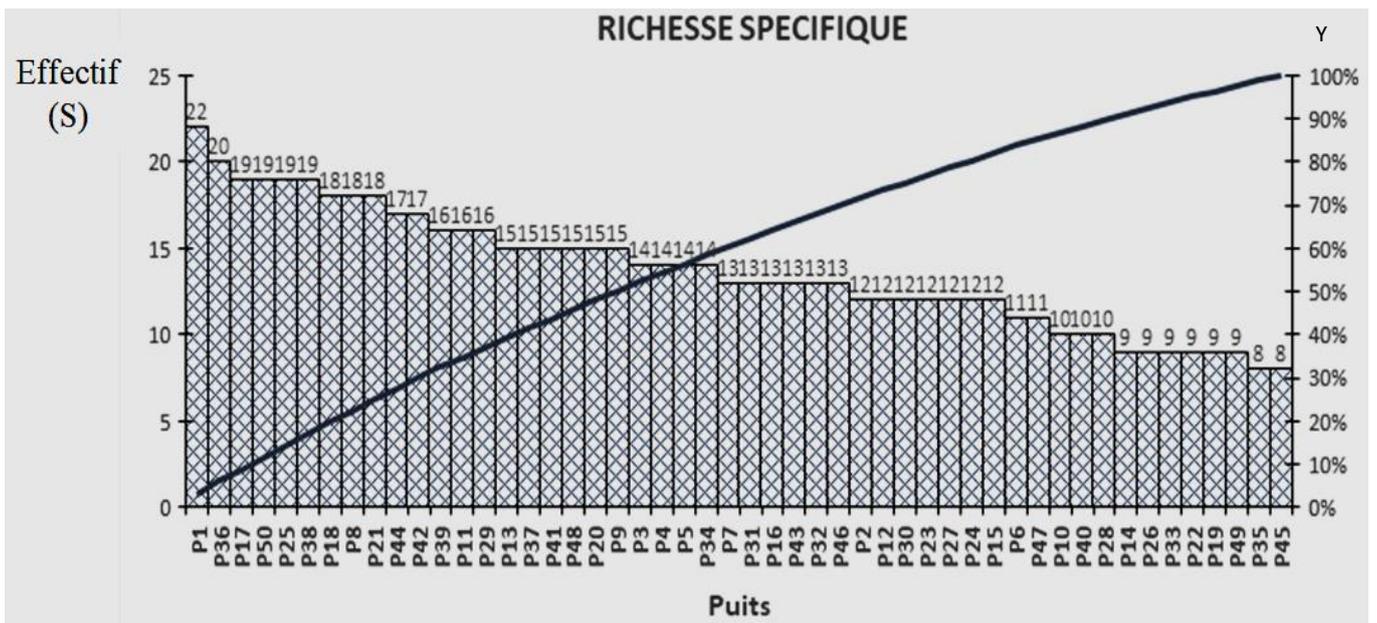


**Figure 50:** Distribution des différentes familles des invertébrés récoltés dans les puits échantillonnés au cours de l'étude dans la ville de Moundou.

#### III.1.4.1.2. Variation spatiale de la richesse spécifique en invertébrés dans les eaux souterraines

Sur l'ensemble des puits échantillonnés et suivant le diagramme de Pareto, la distribution décroissant des richesses spécifiques et de leur fréquence sont rendus à la figure 51.

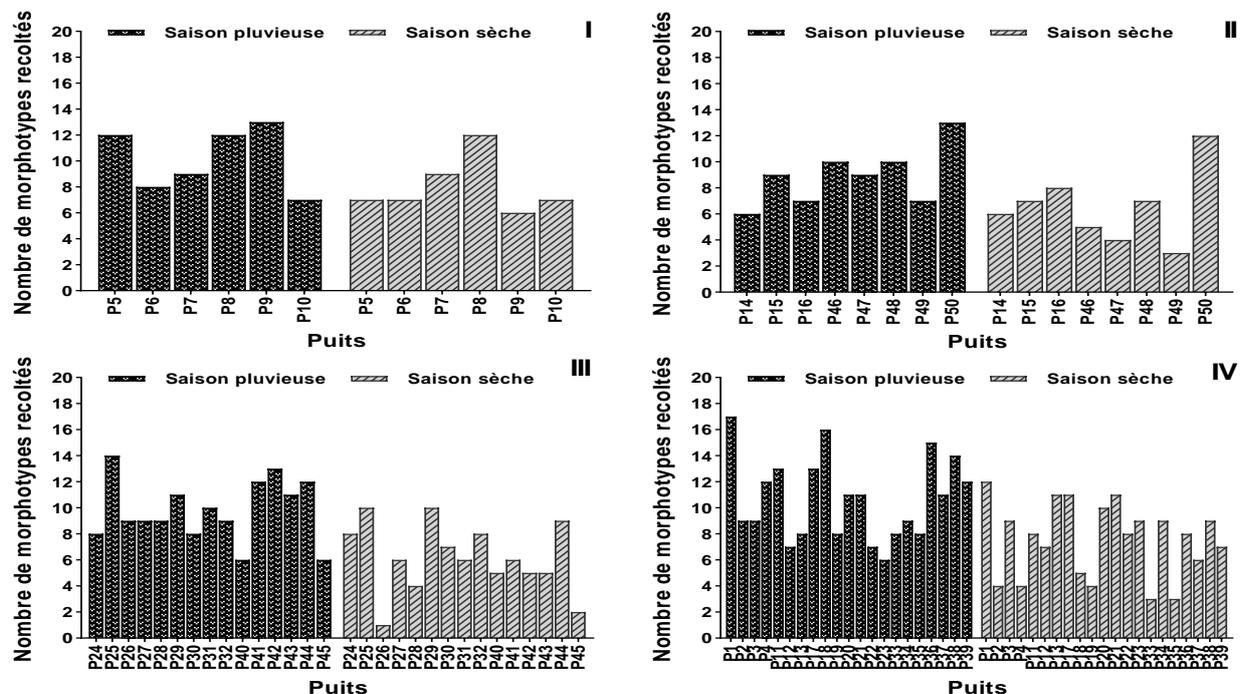
La richesse spécifique en invertébrés dans les stations a varié de 8 à 22 morphotypes. Les stations les plus relativement pauvres sont P35 et P45 où on a retrouvé 8 morphotypes. Le puits P1 a été le plus riche avec 22 morphotypes suivi de P36 (20 morphotypes) et P17, P25, P38 et P50 (19 morphotypes), P8, P18 et P21 (18 morphotypes), P24 et P44 (17 morphotypes), P11, P29 et P39 (16 morphotypes) et des autres puits dont les richesses spécifiques sont comprises entre 10 à 15 morphotypes (Fig.51).



**Figure 51:** Variation spatiale de la richesse spécifique (S) en invertébrés dans les puits étudiés dans la ville de Moundou. Y= Fréquence de la richesse spécifique.

### III.1.4.1.3. Variation saisonnière de la richesse spécifique en invertébrés dans les eaux souterraines

La richesse spécifique minimale (1) a été enregistrée au puits P26 (Fig.52III) pendant la saison sèche dans le troisième arrondissement, et le maximum (17) au puits P1(Fig.52IV) pendant la saison des pluies dans le quatrième arrondissement.



**Figure 52:** Variation saisonnière de la richesse spécifique en invertébrés dans les puits étudiés dans la ville de Moundou. I, II, III, IV = Arrondissements

### III.1.4.2. Caractéristiques taxinomiques de quelques organismes récoltés dans les eaux souterraines de la ville de Moundou

Le tableau xx ci-dessous montre la liste des invertébrés inventoriés dans les quatre arrondissements de la ville de Moundou. Les listes des organismes récoltés par puits et par arrondissement, et les images de quelques organismes sont annexées (Annexes 9, 10, 11, 12 et 16).

#### III.1.4.2.1. Collemboles

Dans les puits de Moundou une diversité exceptionnelle avec un caractère original de la faune des Enthognata. Le présent travail a révélé 5 familles d'Enthognata (Isotomidae, Sminthuridae, Poduridae, Entomobryidae, Hypogastridae) comprenant 9 espèces (*Archistoma besseisi*, *Axelsonia* sp., *Isotomurus tricolor*, *Sminthurinus* sp., *Podura aquatica*, *Entomobrya laguna*, *Lepidocyrtus* sp., *hypogastrura* sp. et *Anurida maritima*) (Tab.XX et Fig.53).

**Tableau XIX:** Liste des invertébrés identifiés dans les eaux des puits dans la ville de Moundou ; I, II, III et IV= Arrondissements.

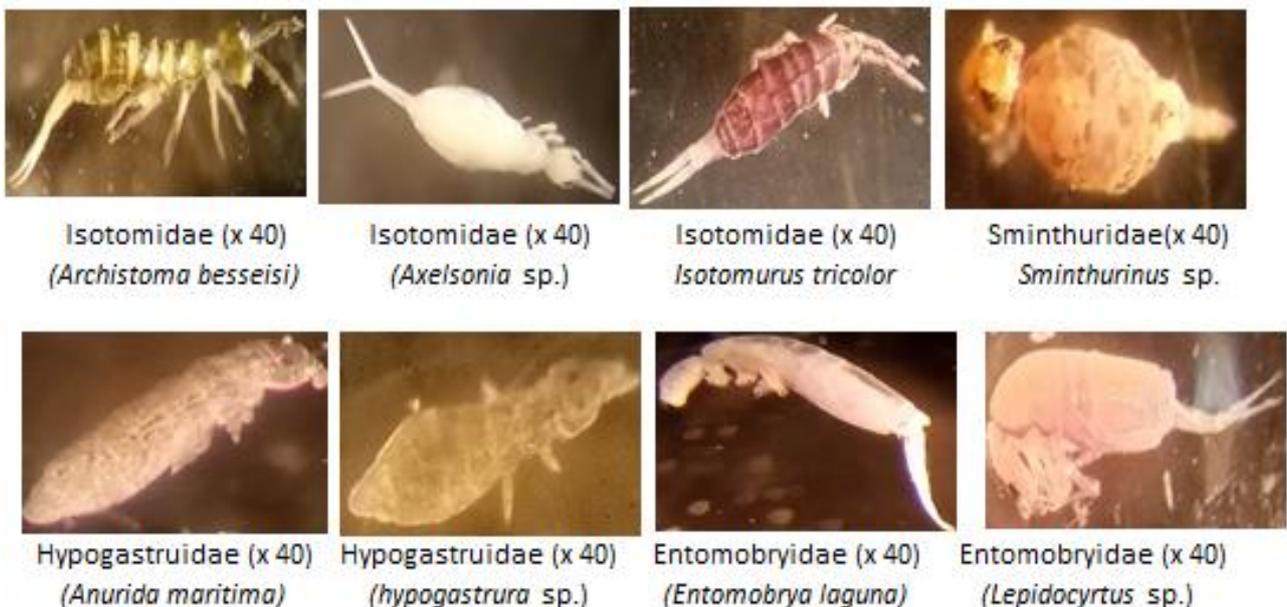
Classes	Ordres	Familles	Genres/ espèces	Mode de vie	Arrondissements				
					I	II	III	IV	
Arachnida	Acari	Macrochelidae	nd	Stygoxènes				1	
		Hydracariens	nd		9	2	14	33	
		Parasitidae	nd		18	5	12	22	
		Trombidiidae	nd				1	3	
		Lycosidae	nd					1	
	Arachneides	Theriidae	<i>Philonida</i> sp.					8	3
		Argiopidae	nd						1
		Dictynidae	nd					1	7
		Argyronete	nd		2				9
		Thomisiidae	nd			1	3	2	
	Phtiracaridae	nd						3	
Scorpionides	Scorpionidae	<i>Chthonius</i> sp,		1					
Crustacea	Ostracodes	Cypridae	nd	Stygophyles	2755	987	4192	14919	
	Copépodes	Cyclopidae	nd		292	675	1544	2989	
	Isopodes	Asellidae	<i>Haplophthalmus</i> sp.			2	1	2	
			<i>Armadillidium</i> sp.		2		2	2	
		Stenasellidae	<i>Metastenasellus</i> sp.	Stygobie	2	8	32	2	
Enthognata	Collemboles	Isotomidae	<i>Archistoma besseisi</i>	Stygophyles				19	
			<i>Axelsonia</i> sp.		3	3	14	6	

			<i>Isotomurus tricolor</i>	Stygophyles		1	1	3
		Sminthuridae	<i>Sminthurinus</i> sp.				2	2
		Poduridae	<i>Podura aquatica</i>			5	1	5
		Entomobryidae	<i>Entomobrya laguna</i>				3	
			<i>Lepidocyrtus</i> sp.		8	16	36	38
		Hypogastruidae	<i>hypogastrura</i> sp.			1	1	
			<i>Anurida maritima</i>			9		
Insecta	Plécoptères	Perlodidae	<i>Doroneuria baumanni</i>	Stygoxènes	4	8	4	13
		Leutridae	<i>Leutra</i> sp.					1
	Ephéméroptères	Ephemerellidae	<i>Ephemerella</i> sp.		1		1	2
			<i>Epéornus</i> sp.		1			
	Tricoptères	Xiphocentronidae	nd		1			
		Polycentropidae	nd					2
		Hydroptilidae	nd		1	1		
		Hydrosychidae	nd			7	1	
		Psychomyidae	nd		1			
		Rossianidae	nd					
	Odonates	Aeshnidae	nd		8		3	3
		Gomphidae	nd		2		3	5
		Libelludae	nd					2
		Cordullidae	nd			2		
	Hémiptères	Mesoveliidae	<i>Mesovelia</i> sp.		1			3
		Leptopodidae	nd		1			
		Hebridae	<i>Hebrus</i> sp.		2	4	1	1
		Notonectidae	<i>Martarega mexicana</i>		4		21	24
		Gerridae	<i>Aquarus</i> sp.			1		1
		Corixidae	<i>Corricella decolor</i>			1	4	
		Naucoridae	nd					1
		Macovellidae	<i>Macovelia</i> sp.				1	
	Coléoptères	Elmidae	<i>Herterlimnius</i> sp.				1	1
			<i>Goenelmis</i> sp.		1			2
			<i>Optiservus</i> sp.				1	2
			<i>Limnius</i> sp.			2	1	
		Dytiscidae	<i>Leodessus</i> sp.		2	1	6	8
			<i>Hydrotrupes</i> sp.		1	2	15	16
<i>Hydrovatus</i> sp.					2	5		
<i>Hyphydrus</i> sp.						1		
<i>Coptotomus</i> sp.				1	1	2		

			<i>Bidessus</i> sp.					1
			<i>Platambus</i> spp.				5	1
			<i>Eretes</i> spp.					3
			<i>Esolus</i> spp.				3	6
			<i>Celina</i> spp.			1		
		Hydrophilidae	<i>Helophorus</i> sp.		1	2	5	3
			<i>Derallus</i> sp.			4		1
		Hydraenidae	<i>Hydraena</i> sp.		11		1	12
			<i>Limnebius</i> sp.				1	11
			<i>Ochthebius</i> sp.		6			2
		Salpingidae	<i>Aegialites</i> sp.					1
		Sphercheidae	<i>Dasycercus</i> sp.					4
		Staphylinidae	nd				1	6
		Hydroscaphidae	<i>Bledius</i> sp					1
		Chrysomelidae	<i>Donacia</i> sp.				1	2
	Diptères	Anophelinae	<i>Anopheles</i> sp.			11	12	26
		Culiciadae	<i>Culex</i> sp		39	88	22	316
			<i>Deinocerites</i> sp.		2	4	22	4
		Tipulidae	<i>Yamatotipula</i>		8	165	284	73
		Chironomidae	<i>Chironomus</i> spp.	Stygoxènes	441	23	283	499
		Ceratopogonidae	<i>Atrichopogon</i> sp.			4	4	15
		Rhagionidae	nd			2	8	35
		Ephydriae	nd					4
		Syrphidae	nd			1		
		Dixidae	<i>Dixa</i> sp.				7	2
		Anthomyidae	nd		3			1
		Chaoboridae	<i>Chaoborus americanus</i>			2	1	2
		Thaumaleidae	<i>Thaumalea</i> sp.		25			3
		Sciomyzidae	nd			4	3	9
		Psychodidae	<i>Perichoma</i> sp.			8		18
		Stratiomyidae	nd					2
		Athericidae	<i>Atherix</i> sp.				1	
		Limonidae	nd					2
		Simulidae	nd				2	8
		Homoptères	Aphidae	nd				2
	Hyménoptères	Agriotypidae	<i>Agriotypus</i>				2	6
		Mymaridae	<i>Parantodes ophases</i>		1			
		Ichneumoridae	<i>Enthomyphases</i>			4		4

	Orthoptères	Gryllidae	<i>Allonemibus fasciatus</i>	Stygoxènes		1		
	Lepidoptères	Crambidae	nd					1
		Eoparargractus	nd					1
	Thysanoptères	Thrips	nd			1		1
Oligochaeta	Haplotaxides	Tubificidae	nd		587	37	142	37
		Naididae	nd		2		3	6
	Lumbriculides	Lumbriculidae	nd		2			
	Arhynchobdellides	Hirudinae	nd				2	
Myriapoda	Pauropodes	Pauropodidae	<i>Pauropus</i> sp.				1	
	Symphiles	Symphilae	<i>Scolopendrella</i>					1
	Diplopodes	Diplopodae	<i>Polydesmus</i> sp.				1	4
	Chilopodes	Chilopodae	<i>Cryptops</i> sp.			1	1	2
Gasteropoda	Basommatophères	Physidae	<i>Physa acuta</i>	22	16	6	2	
	Neotaenioglossères	Hydrobiidae	<i>Hydrobia</i> sp	3		1	3	
	Littorinimorphes	Assimineidae	<i>Assiminea ovata</i>		1	4	1	
			Bithyniidae	<i>Jubaia aethiopica</i>			4	
		<i>Gabbiella</i> sp				1		
	Caenogastropodes	Planorbidae	<i>Bulinus tropicus</i>				1	
			<i>Bulinus globolus</i>			1	1	
	Squamates	Viparidae	<i>Bellamyia unicolor</i>				1	
<b>ABONDANCE TOTALE</b>					<b>4284</b>	<b>2342</b>	<b>6973</b>	<b>19789</b>
<b>RICHESSSE SPECIFIQUE</b>					<b>39</b>	<b>45</b>	<b>66</b>	<b>93</b>

nd= taxon non-déterminée ; I, II, III et IV= Arrondissements.



**Figure 53:** Quelques invertébrés Collemboles identifiés au cours de l'étude.

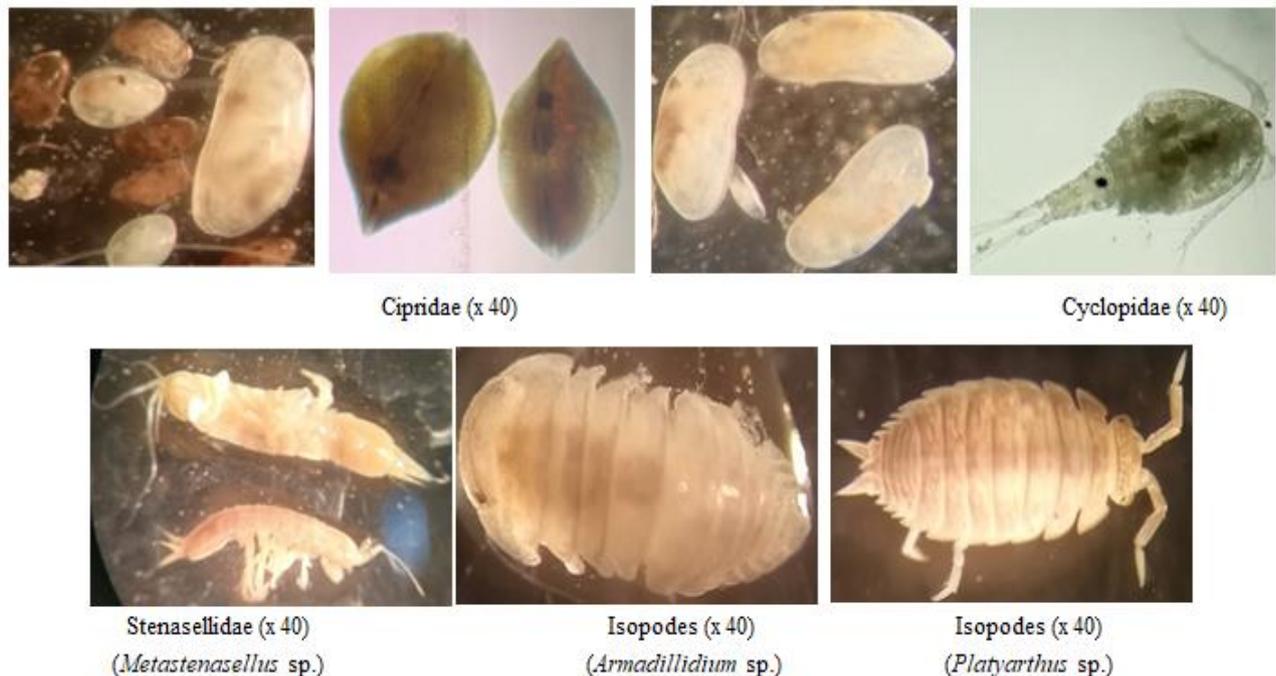
### III.1.4.2.2. Crustacés

#### ➤ Ostracodes

Les Ostracodes récoltés dans les eaux des puits de la ville de Moundou forment un groupe à coquilles bivalves, presque ovales composées de 3 couleurs différentes (blanche, grise et rouge), le corps (petit et lisse, rond et rugueux, allongé) et les appendices présents ou absents (Fig.54). Les soies sont rares sur les valves rondes et rugueuses, deux longues antennes au bord postérieur, de nombreuses soies courtes au bord antérieur.

#### ➤ Copépodes

Les Copépodes Cyclopidae stygobies ont été récoltés dans toutes les eaux de puits de Moundou ; le nombre d'individus a oscillé entre 2 (aux puits P10 du 1<sup>er</sup> arrondissement et P2 du 4<sup>e</sup> arrondissement) et 990 au puits P17 dans le 4<sup>e</sup> arrondissement.



**Figure 54:** Quelques invertébrés Crustacés identifiés au cours de l'étude.

### III.1.4.2.3. Description de *Metastenasellus* sp

*Metastenasellus* sp.: le mâle est de très petite taille puisqu'il mesure 6,91mm de longueur (Fig. 55A). Les longueurs du céphalon, des sept périonites, des deux pléonites libres et du pléotelson sont respectivement : 0,57, 0,61, 0,62, 0,62, 0,64, 0,61, 0,60, 0,68, 0,52, 0,46, 0,98 (Fig. 55A). Le céphalon court, arrondi avec une marge rostrale concave et convexe distalement. Péréonites 1 à 7 moins développées, les 6<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> étant les plus longues. Pléonites 1 et 2

libres et aussi longues que 90 % de la longueur de la péréonite 7. Pléotelson subrectangulaire à marge caudale ronde et recouvrant partiellement le protopodite de l'uropode. Segment interne de l'uropode plus long, segment externe plus court.

Antenna 1 (Fig. 55B) légèrement plus long que le pédoncule de l'antenne 2 ; fouet à 11 articles ; 27 soies, les 6 dernières portant un seul esthétasque distal (lamina olfactoria) ; les deux premiers articles du pédoncule plus longs que les autres et portent chacun trois et six soies simples, respectivement. Antenna 2 (Fig. 55C) environ 42 % de la longueur du corps, 2,7 fois plus longue que l'antenne 1 ; fouet composé 30 articles ; 88 soies (Fig. 55C) ; articles pédonculaires 5 et 6 portant respectivement 6 et 10 soies ; exopodite vestigial (squama) en forme d'écaillés sur la marge postérieure de l'article 3, avec quatre épines et une longue soie simple. Soies plus nombreuses sur les marges externes des antenna 1 et 2.

Maxillaire 1 (Fig. 55E) : endite clairement séparée de l'exite, avec deux groupes de soies ciliées à l'apex séparées par une soie simple et quatre setules sur la marge externe ; exite avec 12 soies apicales dentelées, avec une à six dents et une soie ciliée ; Sympode maxillaire 2 (Fig. 55F) portant 6 soies simples et une soie forte sur sa marge médiale ; endite avec 12 soies ciliées à l'apex ; lobe moyen avec 7 soies ciliées ; exite externe avec 5 soies ciliées. Endite maxillipède (Fig. 55H) portant 4 soies plumeuses, 3 soies dentelées et une paire de crochets de couplage sur la marge médiale ; palpe 5 articulé ; articles 2 et 3 nettement plus longs et plus forts que les trois autres ; articles 1 à 5 portants 4, 7, 12, 8 et 6 soies simples sur la marge médiale de la base à l'apex, ; l'article 4 avec une soie simple supplémentaire sur sa marge externe ; l'article 5 avec 10 soies simples apicales (Fig. 55F).

Péréopodes 1 (Fig. 55F) : court, puissant et haptoriel, avec un chaetotaxis dense et fortement armé sur la marge ventrale des quatre derniers articles ; basipodite sub-rectangulaire avec quatre soies simples sur la marge antérieure ; l'ischion subtrapézoïdal portant deux soies sur chaque bord ; mérus et carpe subtriangulaires, portant 5 et 6 longues soies, 2 et 7 soies en forme de stylo sur la marge ventrale ; mérus portant 2 soies supplémentaires longues et fortes sur son extrémité externe ; propode 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 marge ventrale et de 8-15 soies simples sur la marge dorsale.

Péréopodes 2 à 7 (Fig. 55G) : typiquement ambulatoires, élancés et plutôt longs, avec un chaetotaxis plus ou moins développé et une morphologie similaire, munis des soies sensorielles

sur la marge dorsale de la base, une forte armature de tout article avec des épines de différentes tailles et peu de soies, une forte épine sternale sur chaque dactyle ; longueurs (mm) des sept péréiopodes.

Pléopode 1 (Fig. 56H) : sans crochet d'accouplement, muni d'un protopodite subrectangulaire à la base et arrondi sur le bord externe. Lame de l'exopodite ovale, avec 11 soies dont cinq terminales simples et lisses et six longues, plantées sur la partie distale de la marge interne (Fig. 56H).

Le pléopode 2 (Fig. 56I): biramé; rameaux largement séparés; protopodite subpentagonal avec une partie distale oblique et un processus développé sur la marge externe, dépassant légèrement le premier segment de l'exopodite; endopodite également biarticulé et nettement séparé de l'exopodite; premier article ankylosé et réduit, l'article distal hypertrophié en longueur, fusiforme, fortement vrillé, contenant un canal hélicoïdal avec une large ouverture afférente et un orifice efférent distal plus petit, entouré par une rampe hélicoïdale et une rangée de dents chitineuses (Fig. 56I). La partie torsadée fait grandement saillie hors de la partie principale du second article ; canal spermatique en hélice poussive enroulant sur trois tours d'spires ; partie distale de l'endopodite non conique et pointue mais plutôt cylindrique et ressemblant à un tire-bouchon (Fig. 56I) ; Endopodite plus long que l'exopodite, et portant 10 ou 11 soies plumeuses (Fig. 56I); Une touffe de sept ou huit soies terminant l'exopodite (Fig. 56I).

Pléopode 3 (Fig. 56K) : muni d'un protopodite très court ; endopodite plus petit que le premier article de l'exopodite et biarticulé ; son deuxième article plus grand, distalement ovale ; exopodite également biarticulé, son premier article long et subrectangulaire porte 15 soies de taille variable sur son bord externe ; son second article subtriangulaire, plus court que le premier porte 5 soies proximales simples sur son bord externe.

Pléopode 4 (Fig. 56L) : muni d'un court protopodite ; endopodite biarticulé avec son second article 3 fois plus long que le premier ; exopodite grand, muni seulement d'une seule soie à l'apex, à suture interarticulaire très oblique, son premier article beaucoup plus gros et plus long que le second.

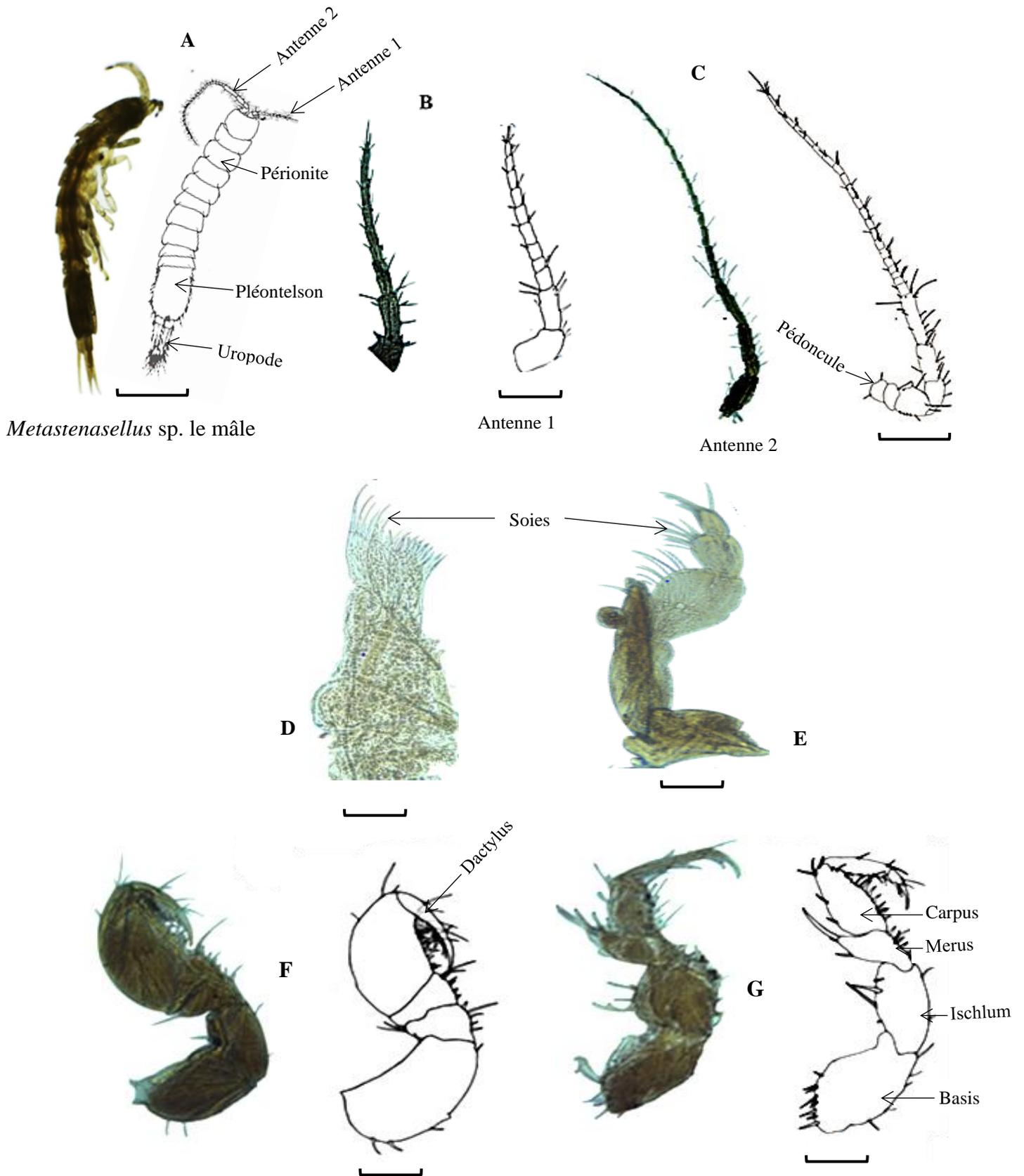
Pléopode 5 (Fig. 56M) : muni d'un protopodite subrectangulaire ; endopodite biarticulé avec son second article plus court que le premier ; exopodite biarticulée, presque de même

taille que l'endopodite ; premier article court, le deuxième article beaucoup plus gros et plus long que le premier.

Uropode (Fig. 56N) : biramé aussi long que le pléotelson ; protopodite subrectangulaire à soies dorsales et marginales ; endopodite légèrement plus long que l'exopodite, avec à la fois de nombreuses soies et épines et plusieurs longues soies apicales ; soies sensorielles présentes uniquement sur l'endopodite.

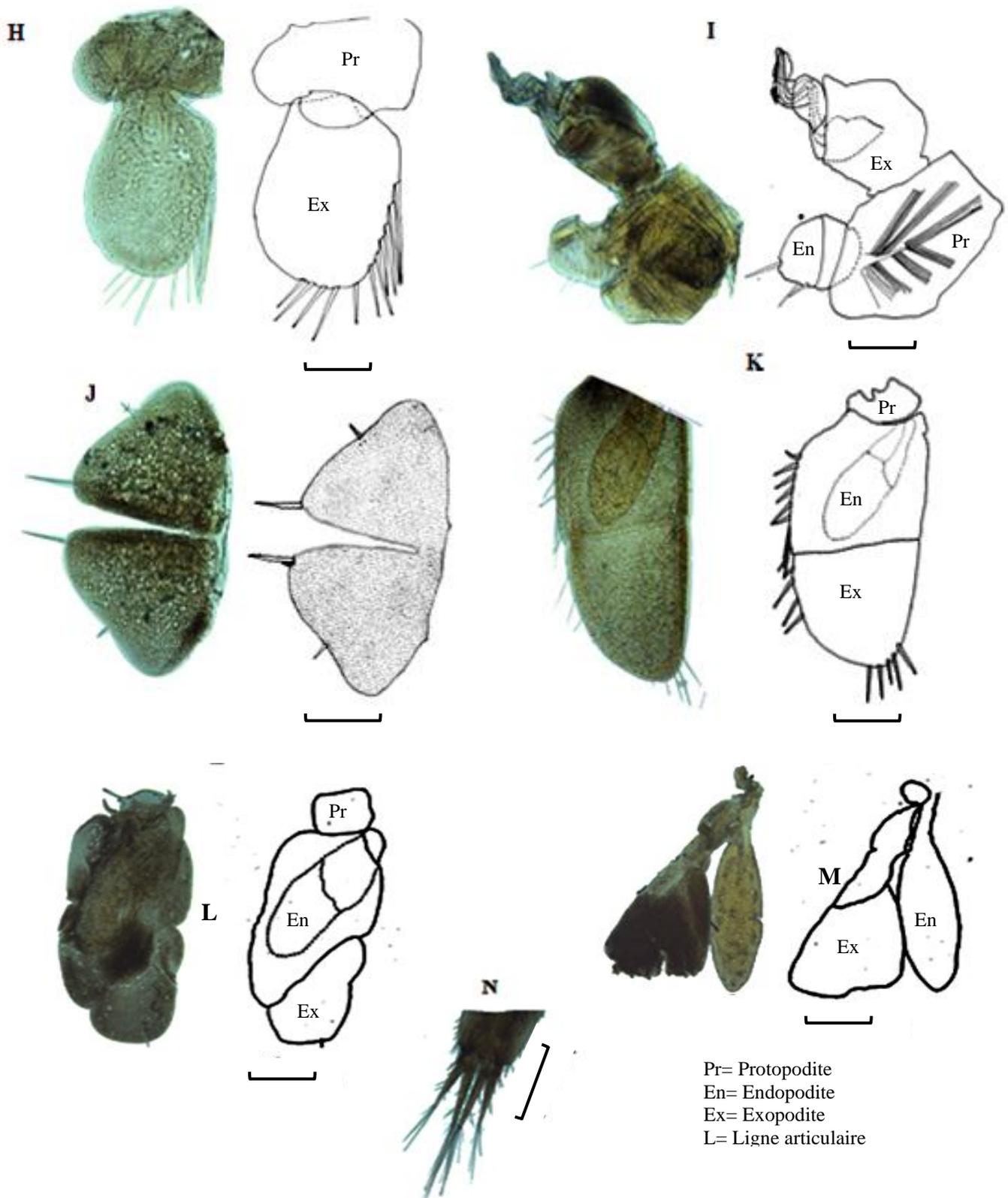
### **Femelle:**

La longueur moyenne des femelles est de 8 mm. Pléopode 2 simple et classique (Fig. 56J) muni de deux plaques sub-triangulaires divisées par une suture transversale séparée sur 2/3 de sa longueur, avec des angles externes et distaux arrondis. Chaque plaque porte deux soies marginales : une courte près du milieu de la marge latéro-distale, et une plus longue près de l'apex de la lame mais absence de soies pariétales courtes et simples près de la marge interne (Fig. 56J).



**Figure 55:** Morphologie générale de *Metastenasellus* sp. A= *Metastenasellus* sp., vue dorsale , éch= 1mm ; B= Antenne 1, éch= 200  $\mu$ m ; C= Antenne 2, éch= 300  $\mu$ m ; D= Maxillipède droite, éch= 300  $\mu$ m E= Maxillipède gauche, éch= 400  $\mu$ m ; F = Périopodes 1, éch= 100  $\mu$ m ; G = Périopodes 2, éch= 100  $\mu$ m.

Vue longitudinale



**Figure 56:** Photos et schémas des Pléopodes de *Metastenasellus* sp du Tchad.  
 H = Pléopode 1, éch= 100 µm ; I = Pléopode 2, éch= 100 µm ; J = Pléopode 2 de la femelle, éch= 100 µm ; K= Pléopode 3, éch= 100 µm ; L= Pléopode 4, éch= 100 µm ; M = Pléopode 5, éch= 100 µm ; N= Uropode, éch= 250 µm.

Vue longitudinale

## Remarques

Les rames (exopodite et endopodite) sont nettement séparées, ce qui le rapproche *Metastenasellus* sp de *M. powelli* (Fig.57B), *M. leysi* (Fig.57F), et de *M. camerounensis* (Fig.57G). Cependant, l'écart considérable entre ses deux rames chez *Metastenasellus* sp., l'en éloigne.

Le second article de son exopodite porte uniquement trois soies comme chez *M. leleupi* (Fig.57A), *M. wikkiensis* (Fig.57C), *M. tarrisei* (Fig.57H) et *M. boutini* (Fig.57I) contre cinq à sept soies chez *M. dartivellei* (Fig.57D) et *M. congolensis* (Fig.57E).

La présence d'une soie distale terminale sur son exopodite l'éloigne de *M. tarrisei* (Fig.57H) et de *M. boutini* (Fig.57I) qui ont plutôt une longue soie subterminale. *M. wikkiensis* (Fig.57C) et *M. leleupi* (Fig.57A) dont les soies du second article de l'exopodite sont plus longues le diffèrent encore de *Metastenasellus* sp.

De plus, *M. wikkiensis* (Fig.57C) est muni au niveau du premier article de l'endopodite bien visible. tandis que chez *Metastenasellus* sp, cet article est presque inexistant.

Les différences morphologiques observées avec les autres espèces pourront davantage être confirmées par les investigations biomoléculaires.

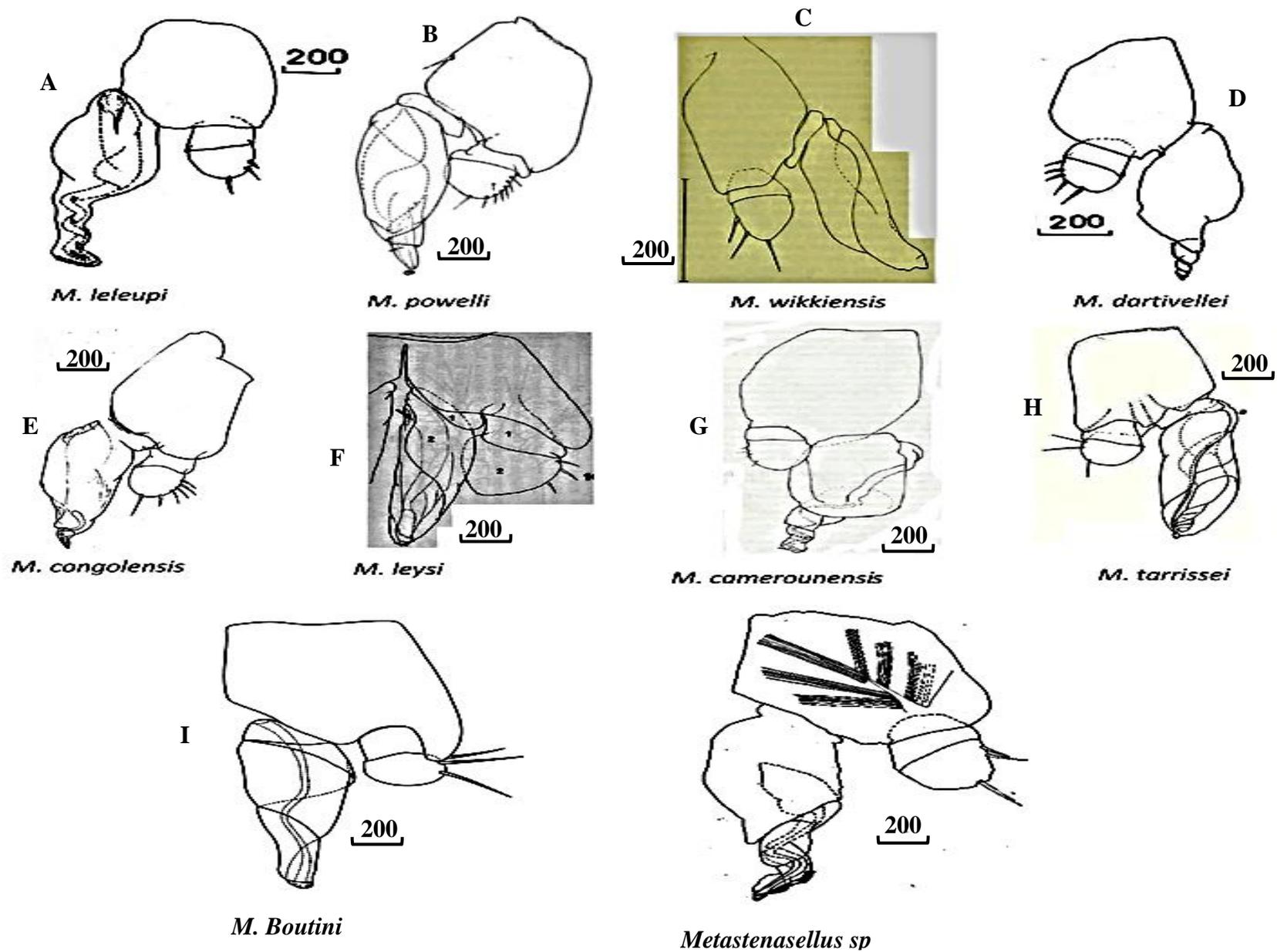


Figure 57: Etude comparée du pléopodes 2 de *Metastenasellus* sp.

### **III.1.4.2.5. Variations spatiales et saisonnières de l'abondance relative des taxons présents dans les eaux souterraines de la ville de Moundou**

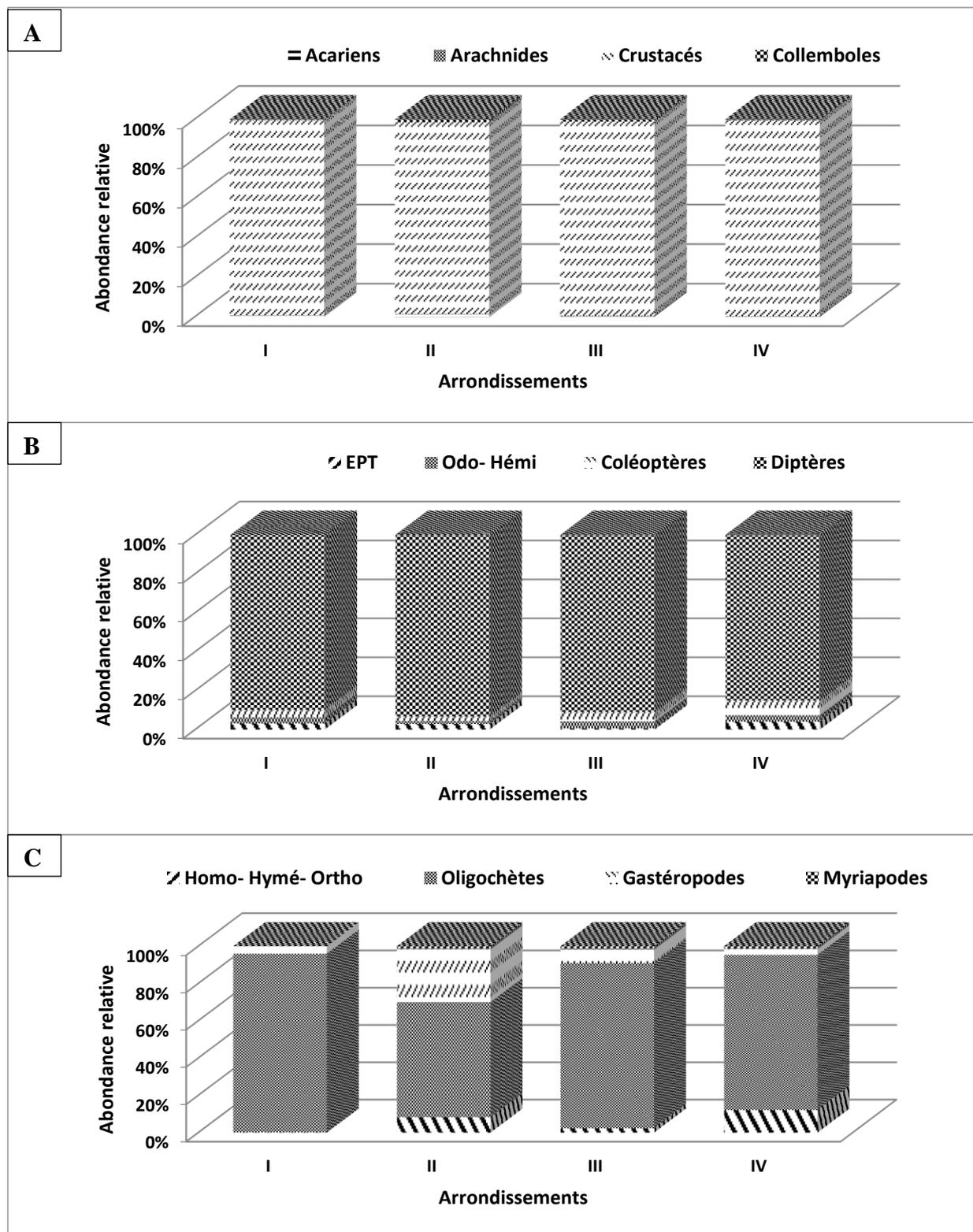
L'abondance relative des taxons de la stygofaune récoltés dans les eaux souterraines sont présentées par les figures ci-dessous. L'hétérogénéité spatiale des peuplements des points d'eau se vérifie dans la répartition des abondances qui présentent des différences importantes entre les stations étudiées.

#### **III.1.4.2.5.1. Variation spatiale de l'abondance des principaux ordres**

La figure 58 présente les variations spatiales de l'abondance relative de quelques ordres/embranchements d'invertébrés souterrains récoltés dans l'ensemble des sites d'étude.

L'ensemble des puits étudiés a permis la récolte de 91 taxons aquatiques ; 33388 individus. La répartition des abondances relatives n'est pas homogène entre les localités (Fig.58). Les Crustacés constituent l'effectif le plus élevé de la faune récolte avec 28426 individus soit 85,13% ; ce site est dominé par les Ostracodes (22853individus, soit 68,44%), suivi des Copépodes (5500 individus, soit 16,47 %). Les Crustacés sont répartis dans tous les arrondissements de la ville de Moundou (Fig.58A).

Quatre autres abondances importantes, il s'agit des Diptères (2921 individus, soit 8,74%); la plupart des Diptères et Coléoptères ont été récoltés dans le 3<sup>e</sup> et le 4<sup>e</sup> arrondissement (Fig.58B).



**Figure 58** : Variations spatiales de l'abondance relative des principaux ordres et embranchements de la faune souterraine récoltée au cours de l'étude.

EPT = Ephéméroptères – Plécoptères - Tricoptères, Odo-Héli=Odonates-Hémiptères, Homo - Hymé - Ortho = Homoptère - Hyménoptères - Orthoptères.

### III.1.4.2.5.2. Variation saisonnière de l'abondance des familles

La figure 59 montre les variations saisonnières de l'abondance relative des principales familles du peuplement inventoriées dans l'ensemble des sites. Au total, 91 familles dont 4 de Crustacés dominés par les Cypridae (80,39 % soit 22853 individus) recoltée dans le 4<sup>e</sup> arrondissement pendant les deux périodes d'étude (Fig.59A), suivi par la famille des Cyclopidae (16,47 % soit 5500 individus) enregistré abondamment dans le 3<sup>e</sup> arrondissement pendant la saison des pluies, viennent ensuite les Stenasellidae (0,18 % soit 62 individus) et les Asellidae (0,032 % soit 11 individus) peu abondants, recoltés dans pendant la saison des pluies dans le 4<sup>e</sup> arrondissement (Fig.59A).

Les Diptères comptent 18 familles dont les plus représentées avec des abondances respectives de 4,35% (1453 individus) pour les Chironomidae dans le 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements en 1<sup>er</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements pendant les deux saisons, 2,08% (695 individus) pour les Culicidae, 1,55% (520 individus) pour les Tipulidae dans le 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> pendant les deux saisons (Fig.59E). Les restes (Anophelidae, Rhagionidae, Thaumaleidae, Psychodidae, Ceratopogonidae, Limonidae, Sciomyzidae, Simulidae, Dixidae, Chaoboridae, Anthomyidae, Ephydriidae, Stratiomyidae, Syrphidae et Athericidae) ne représentent que 1% (Fig.59E).

Les Coléoptères sont peu abondants montrent une présence de 9 familles dont les Dytiscidae constituent le groupe le mieux représenté 0,25% recoltée dans 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements pendant (Fig.59F), suivi par les Hydraenidae 0,13%, les Elmidae 0,032% dans le 1<sup>er</sup> et 4<sup>e</sup> pendant la saison des pluies (Fig.59F). Alors que le pourcentage de l'abondance des autres familles reste très faible.

Les Odonates et Hémiptères présentent plusieurs familles. La famille la plus abondante pour les Odonates est celle des Aeshnidae (0,041% soit 14 individus), suivi par les Gomphidae (0,03% soit 10 individus) recoltée pendant les deux saisons dans le 4<sup>e</sup> arrondissement (Fig.59G). Pour les Hémiptères, les Notonectidae représentent une fréquence de 0,14% soit 49 individus suivi des Hebridae 0,02% soit 8 individus recoltées dans le 3<sup>e</sup> et le 4<sup>e</sup> arrondissement pendant les deux saisons (Fig.59G). L'abondance relative des Homoptères, Hyménoptères et Orthoptères (0,19% soit 65 individus) récoltée dans toutes stations d'échantillonnage compte 5 familles (Aphidae, Agriotypidae, Mymaridae, Ichneumoridae, Gryllidae).

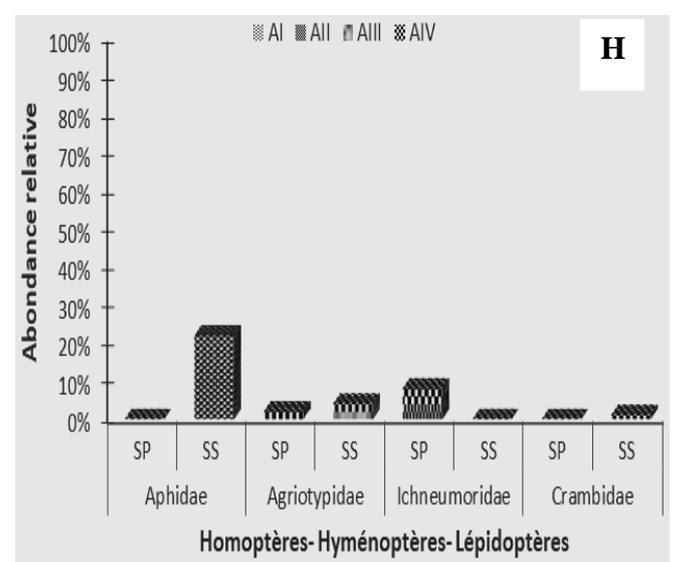
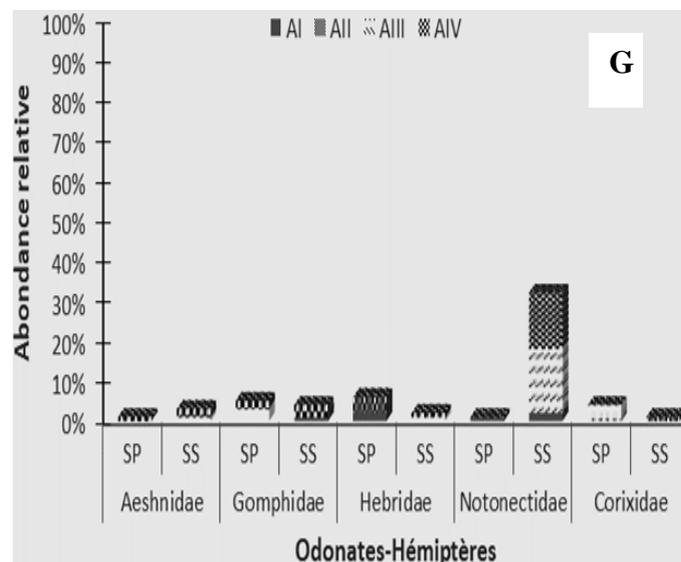
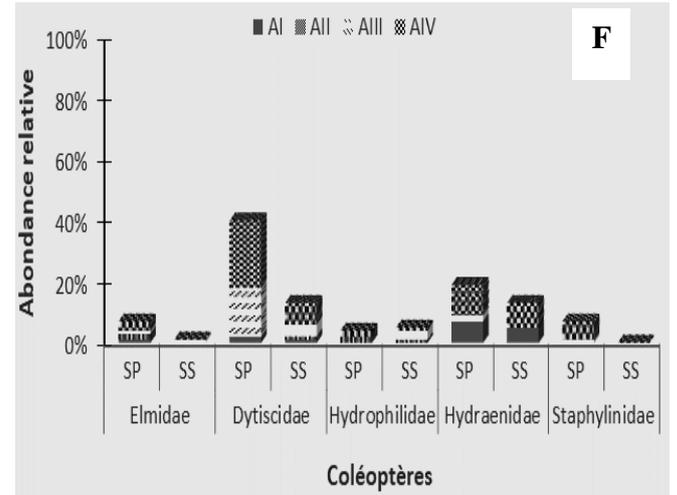
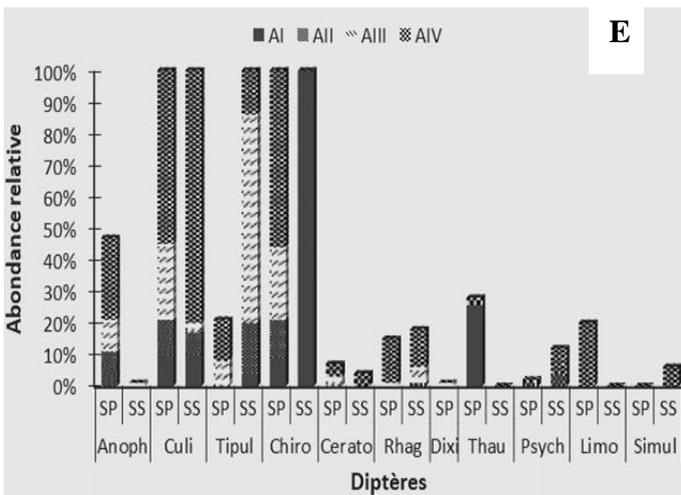
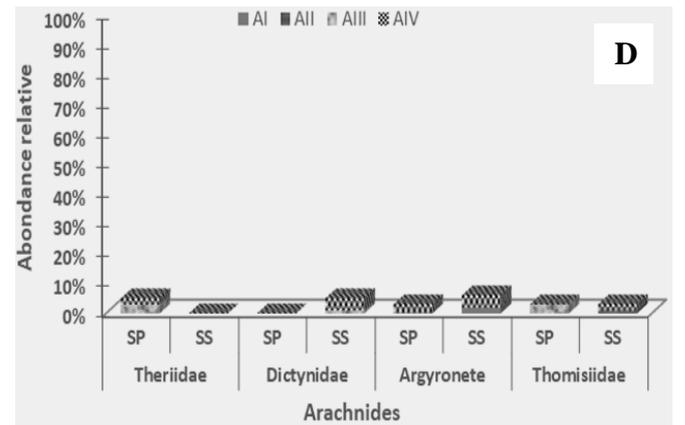
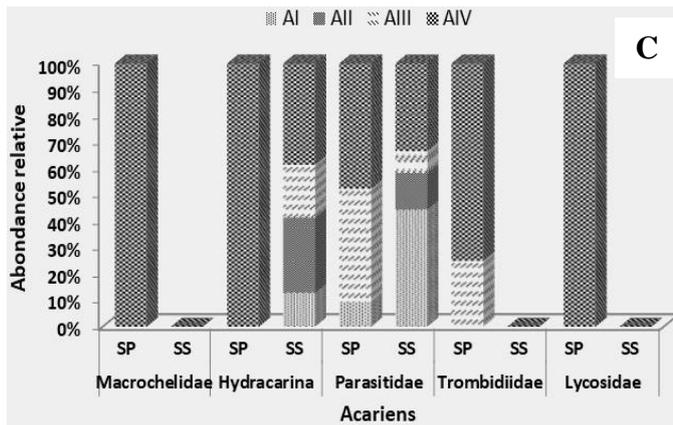
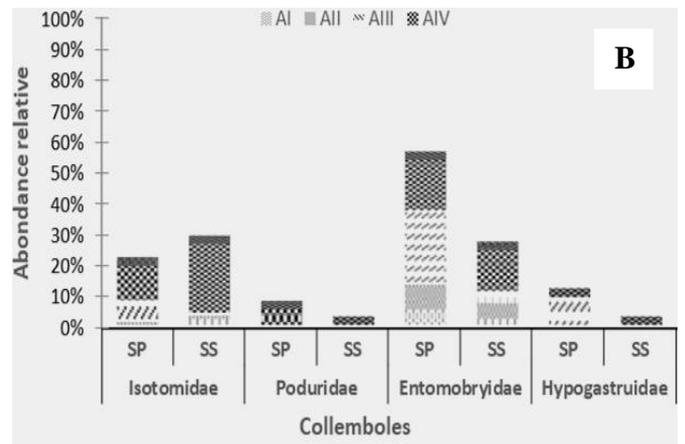
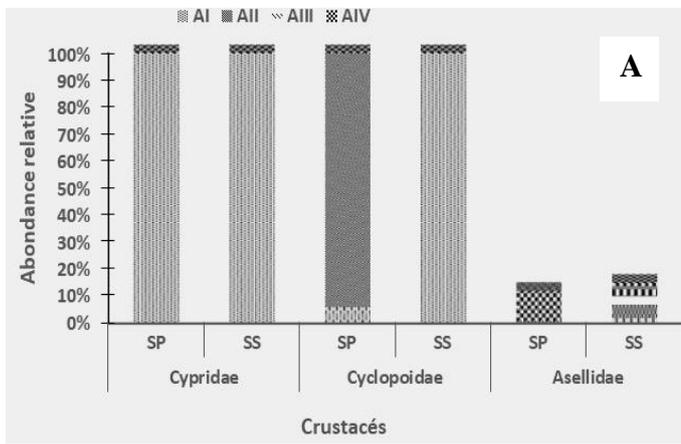
Les groupes les mieux représentés pour les acariens ont été les Hydracarina (0,22% soit 76 individus) et les Parasitidae (0,17% soit 57 individus). Les Arachnides ont été représentés par les Thériidiidae (0,032% soit 11 individus), Argyronètes (0,032% soit 11 individus), Dictynidae (0,023% soit 8 individus) et Thomisiidae (0,017% soit 8 individus) (Fig.59B). Les Acariens et Arachnides sont plus abondants dans le 4<sup>e</sup> arrondissement pendant la saison sèche (Fig.59C et 59D).

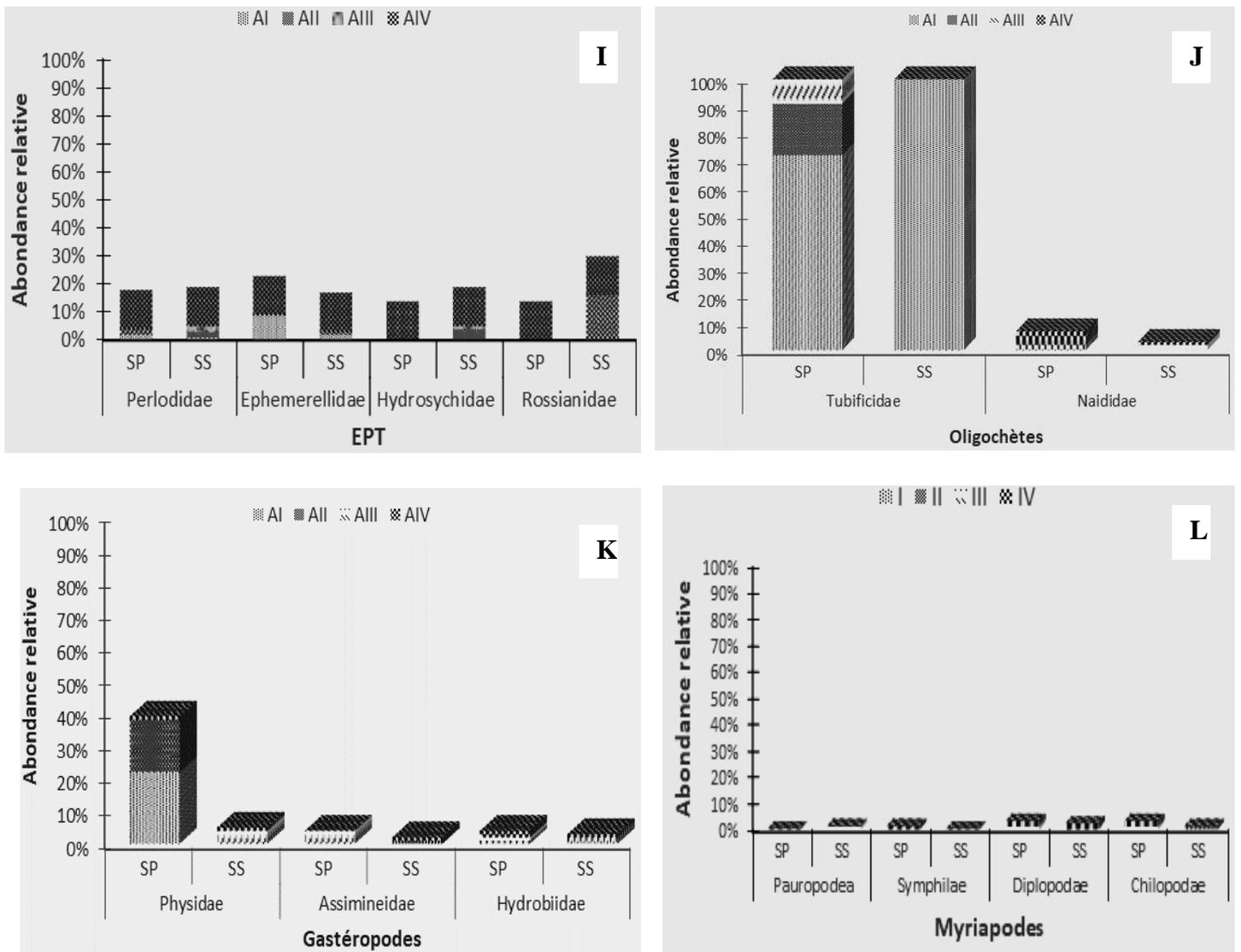
Dans nos prélèvements, les EPT sont représentés par 9 familles réparties de part et d'autre dans les eaux souterraines de la ville de Moundou. Ce sont les Perlodidae, Leutridae, Ephemerellidae, Xiphocentronidae, Polycentropidae, Hydroptilidae, Hydrosychidae, Psychomyidae et Rossianidae. Seule, la famille des Perlodidae a été collectée dans tous les 4 arrondissements (Fig.59 I)

La faune des Oligochètes récoltée dans les puits est représentée par 04 familles avec une abondance des Tubificidae (3,40% soit 1136 individus) qui sont présents majoritairement dans le 1<sup>er</sup> arrondissement pendant la saison des pluies (Fig.59J). Les autres (Lumbriculidae, Naididae, Hirudinae) sont les moins représentés (Fig.59J).

Les Gastéropodes récoltés dans les eaux souterraines de la ville de Moundou renferment essentiellement des Physidae, Assimineidae, Hydrobiidae, Buthyniidae, Planorbinae, Viparidae. Les Physidae constituent la famille la plus dominante récoltée dans le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>e</sup> arrondissement pendant la saison des pluies (Fig.59K), suivie par les Hydrobiidae. Les autres sont récoltés dans le 4<sup>e</sup> arrondissement et pendant toutes les saisons, à l'exception de la famille Viparidae qui est absente dans les puits en saison sèche (Fig.59K).

Les Myriapodes ont été représentés par quatre familles (Pauropoda, Symphyla, Diplopoda, Chilopoda). Les Diplopoda dominent avec 5 individus suivis par les Chilopoda avec 4 individus. Les Myriapodes sont récoltés majoritairement dans les 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements et absents dans le 1<sup>e</sup> et le 2<sup>e</sup> arrondissement (Fig.59L).





**Figure 59:** Abondances relatives saisonnières des Acariens et Arachnides recoltées sur l'ensemble des stations d'étude. SP : saison pluvieuse, SS : saison sèche. I, II, III, IV= Arrondissements

Anophelidae = Anoph; Culicidae = Culici; Tipulidae = Tipul; Chironomidae = Chiro; Ceratopogonidae= Cerato, Rhagionidae= Rhagio; Ephydriidae = Ephy; Syrphidae= Syrph; Dixidae = Dixi; Anthomyiidae = Antho; Chaoboridae = Chaobo; Thaumaleidae= Thaum, Sciomyzidae= Sciom, Psychodidae= Psycho, Stratiomyidae =Stratio, Athericidae=Atheri, Limoniidae=Limo, Simuliidae= Simul.

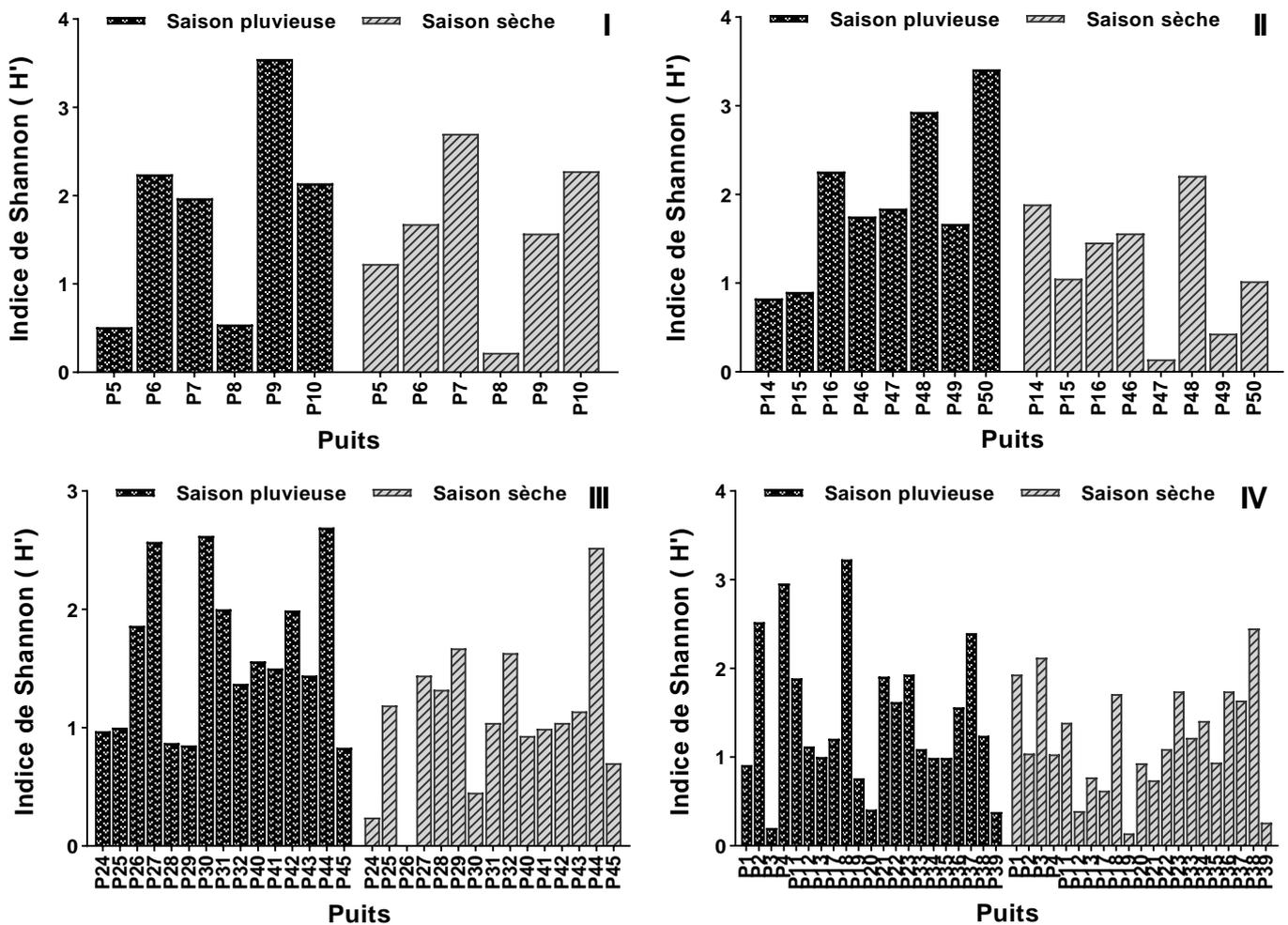
### III.1.4.2.5.3. Variation saisonnière de l'indice de diversité de Shannon-Weaver et de l'équitabilité de Piélu

La variation saisonnière de l'indice de diversité de Shannon-Weaver ( $H'$ ) et de l'équitabilité ( $J$ ) de Piélu dans chaque localité est présentée à la figure 60.

Les valeurs de la diversité spécifique (Fig.60) entre les différentes stations se situent entre 0,20 et 3,55 pendant la saison des pluies et entre 0 et 2,70 pendant la saison sèche.

Pendant la saison des pluies, les plus grandes valeurs d'indice de Shannon et Weaver ont été enregistrées à P9 ( $H' = 3,55$ ) ; Fig.60I), P50 ( $H' = 3,41$  ; Fig.60II), P18 ( $H' = 3,23$  ; Fig.60IV) et P44 ( $H' = 2,69$  ; Fig.60III). Ce qui montre que les peuplements décrits au sein de ces stations sont plus diversifiés. Les plus faibles valeurs ont été enregistrées à P3 ( $H' = 0,20$  ; Fig.60IV), P5 ( $H' = 0,51$  ; Fig.60I), P14 et P45 ( $H' = 0,83$  ; Fig.60II et 60III), P26 ( $H' = 0,85$  ; Fig.60III), P29 ( $H' = 0,86$  ; Fig.60III) et P15 ( $H' = 0,90$  ; Fig.60II).

En saison sèche, les plus fortes valeurs d'indice de Shannon et Weaver ( $H' = 2,70$ ,  $H' = 2,52$ ,  $H' = 2,45$  et  $H' = 2,21$ ) ont été obtenues respectivement à P7 (Fig.60I), P44 (Fig.60III), P38 (Fig.60IV) et P48 (Fig.60II). Les peuplements des puits P26 ( $H' = 0,00$  ; Fig.60III), P19 et P47 ( $H' = 0,14$  ; Fig.60II et 60IV) et P9 ( $H' = 0,22$  ; Fig.60I) ont été les moins diversifiés.

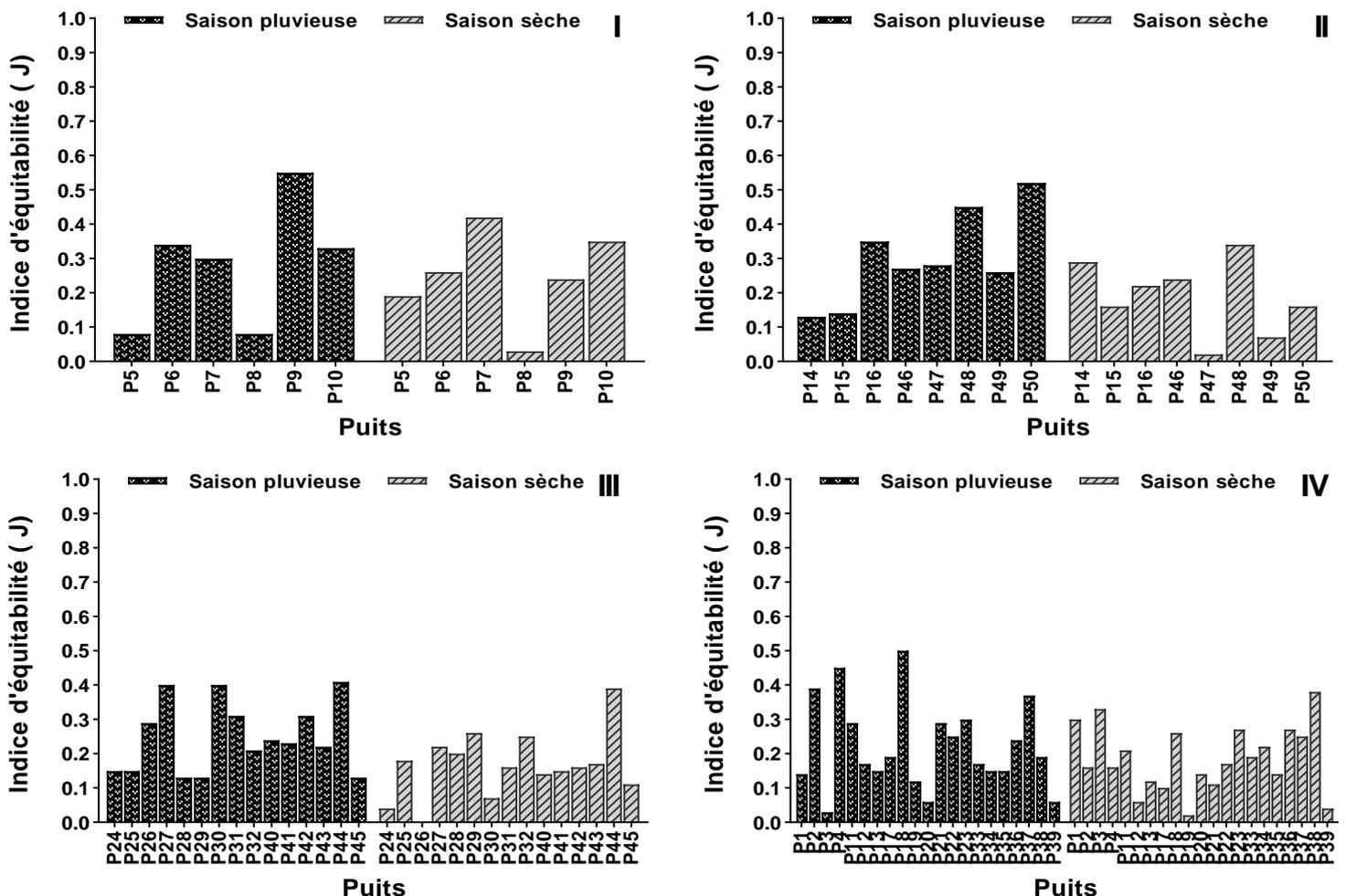


**Figure 60:** Variation saisonnière de l'indice de Shannon ( $H'$ ) dans les stations d'échantillonnage. I, II, III et IV= arrondissements

Par ailleurs, les valeurs de l'indice d'équitabilité (J) de Piélou ont varié de 0,03 à 0,55 pendant la saison des pluies et de 0 à 0,42 en saison sèche.

Pendant la saison des pluies, les espèces des stygofaunes des puits P9 (J= 0,55; Fig.61I), P50 (J= 0,52; Fig.61II), P18 (J=0,50; Fig.61IV), P4 (J= 0,45; Fig.61IV), P44 (J= 0,41; Fig.61III), P27 et P30 (J= 0,40; Fig.61III) ont été relativement équilibrées. Par contre celles des puits P3 (J= 0,03; Fig.61IV), P20 et P39 (J= 0,06; Fig.61IV), P5 et P8 (J= 0,08; Fig.61I), P14, P28, P29, P45 (J= 0,13; Fig.61II et 61III) et P15 (J= 0,14; Fig.61II) ont été marquées par des dominances.

En saison sèche, les puits P7 (J= 0,42 ; Fig.61I), P44 (J= 0,39 ; Fig.61III), P38 (J= 0,38 ; Fig.61IV), P48 (J= 0,34 ; Fig.61II), P3 (J= 0,33 ; Fig.61IV) et P1 (J= 0,30 ; Fig.60IV) ont été également marquées par des dominances de peuplements.



**Figure 61:** Variation saisonnière de l'indice d'équitabilité (J) dans les stations d'échantillonnage. SP= saison des pluies, SS= saison sèche.

I, II, III et IV= arrondissements

### **III.1.4.3. Analyses multivariées présentant la distribution de la faune souterraine sous l'influence des paramètres morphohydrologiques et physicochimiques**

#### **III.1.4.3.1. Corrélations entre les paramètres morphohydrologiques et l'abondance de la faune aquatique des puits**

L'analyse des corrélations entre les paramètres morphométriques et la faune aquatique des puits et entre faunes (annexe 13) a montré des corrélations significativement ( $p < 0,05$ ) positives et négatives.

- Distance avec la latrine évolue positivement avec Diplopodaes ( $r= 0,295$ ), Asellidae ( $r= 0,332$ ), mais négativement avec Dixidae ( $r= - 0,283$ ) et Stenasellidae ( $r= - 0,280$ ).
- Diamètre est positivement lié à Limonidae ( $r= 0,282$ ), Mesovellidae ( $r= 0,305$ ), Rossianidae ( $r= 0,282$ ) et Theriidae ( $r= 0,343$ ), par contre il est négativement corrélé à Dytiscidae ( $r= - 0,335$ ) et Gomphidae ( $r= - 0,420$ ).
- Plus la colonne d'eau est élevée, plus on a Chironomidae ( $r= 0,362$ ) et Stenasellidae ( $r= 0,367$ ); la profondeur évolue dans le même sens avec Chironomidae ( $r= 0,356$ ) et Stenasellidae ( $r= 0,284$ ). L'altitude n'est pas favorable à Staphylinidae ( $r= - 0,286$ ) ni à Cypridae ( $r= - 0,297$ ).

Enfin le niveau piézométrique est défavorable au Culicidae ( $r= - 0,280$ ) et Perlodidae ( $r= - 0,296$ ) mais favorable à Theriidae ( $r= 0,333$ ).

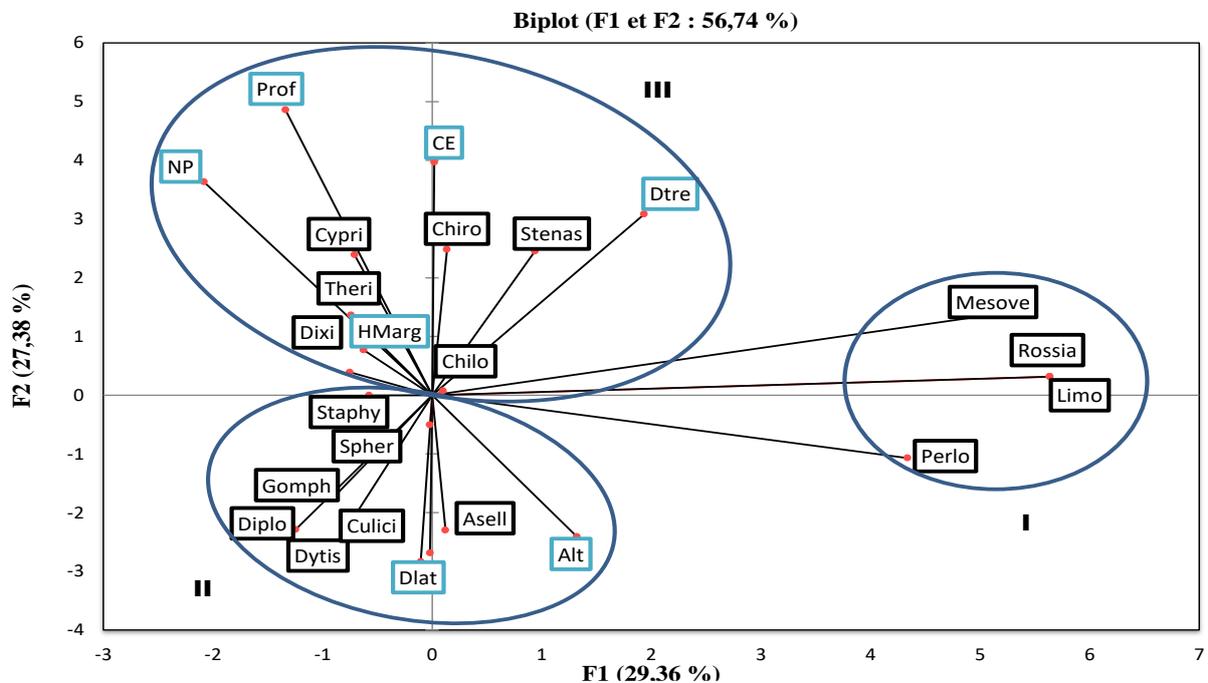
Par ailleurs plusieurs groupes fauniques apparaissent positivement liés. C'est le cas de:

- Perlodidae avec Rossianidae ( $r= 0,627$ ), Limonidae ( $r= 0,627$ ), et Mesovellidae ( $r= 0,465$ ) ; ces deux derniers groupes sont aussi liés à Rossianidae, soit respectivement  $r= 1$  et  $r= 0,814$
- Gomphidae est corrélé à Dytiscidae ( $r= 0,387$ ), Culicidae ( $r= 0,289$ ) et Diplopodaes ( $r= 0,314$ );
- Mesovellidae à Chironomidae ( $r= 0,302$ ) Limonidae ( $r= 0,814$ ); Dytiscidae à Culicidae ( $r= 0,390$ ) qui lui est lié à Diplopodaes ( $r= 0,284$ ).

#### **III.1.4.3.2. Projection des paramètres morphohydrologiques et la faune souterraine sous l'ACP et l'ACH**

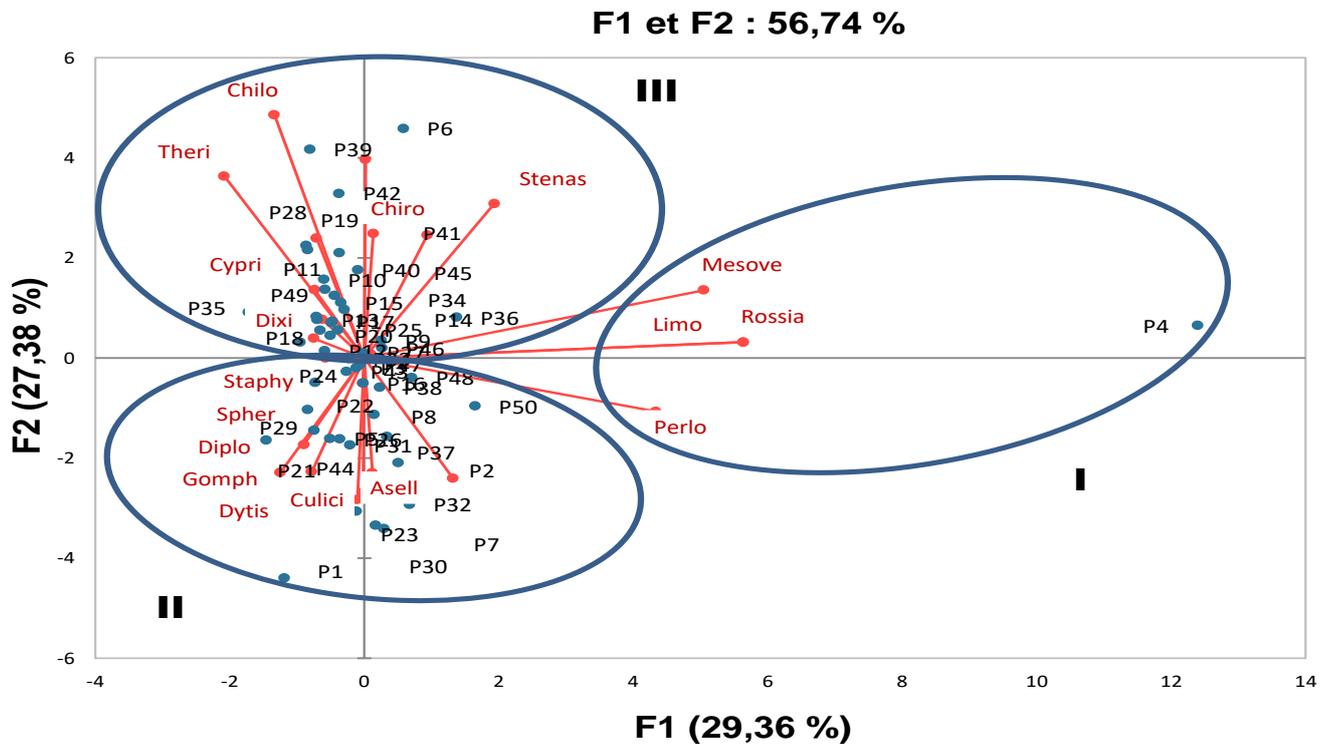
Le cercle des corrélations de la figure 62 ressort 3 groupes fauniques bien séparés les uns des autres. Le premier groupe d'organismes est fait des familles des Mesovellidae, Rossianidae, Limonidae et de Perlodidae qui ont une forte contribution positive sur l'axe 1. Ces organismes du groupe 1 ont présenté une relation avec le puits P14. Le second groupe est

celui des familles d'organismes Dytiscidae, Staphylinidae, Asellidae, Diplopodae, Sphercheidae, Culiciidae et Gomphidae négativement et faiblement liés à l'axe 2 toutes fortement aux variables morphohydrométriques suivant : distance avec les latrines et l'altitude (Fig.62). Les organismes du groupe 2 ont été très présents dans 19 puits (P1, P2, P3, P7, P23, P25, P26, P30, P32, P38, P43, P47 P12, P31, P36, P37, P46, P48 et P50) (Fig.63). Enfin, le groupe 3 (Dixidae, des Cypridae et des Theriidae, Stenasellidae, Chironomidae et Chilopodae) a été positivement lié à l'axe 2 et aux variables morphohydrométriques qui sont : le Niveau piézométrique, la hauteur de margelle, le diamètre couche d'eau et la profondeur des puits. Ces organismes du groupe 3 ont été très présents dans 30 puits (P5, P6, P8, P9, P10, P11, P13, P14, P15, P16, P17, P18, P19, P20, P21, P22, P24, P27, P28, P29, P33, P34, P35, P39, P40 et P41, P44 et P45) (Fig.63).



**Figure 62 :** Projection des variables morphohydrométriques et fauniques sur le plan factoriel (F1×F2).

Alt= altitude, CE= épaisseur de la colonne d'eau, Dtre. = diamètres des puits, Dlat= distance du puits avec la latrine, HMarg= hauteur de la margelle, NP= niveau piézométrique, Prof= Profondeur du puits. Asell= Asellidae, Chiro= Chironomidae, Culici= Culicidae, Cypri= Cypridae, Diplo= Diplopodae, Dixi= Dixidae, Dytis= Dytiscidae, Ephe= Ephemerellidae, Gomp= Gomphidae, Limo= Limonidae, Meso= Mesovellidae, Perlo= Perlodidae, Staph= Staphylinidae, Stenas= Stenasellidae, Spher= Sphercheidae, Rossia= Rossianidae, Theri= Theriidae.



**Figure 63 :** Projection des variables fauniques et les puits sur le plan factoriel (F1×F2).

### III.1.4.3.3. Corrélations entre les paramètres physicochimiques et la faune aquatiques des puits et entre la bactériologie et la faune

Certains paramètres physicochimiques et bactériologiques ont montré des corrélations significatives ( $p < 0,05$ ) positives et d'autres négatives (annexes 14 et 15). Ainsi :

#### Annexe 14

La température était positivement corrélée aux Poduridae ( $r = 0,328$ ), le pH aux Cypridae ( $r = 0,297$ ) et Simulidae ( $r = 0,428$ ), l'alcalinité aux Isotomidae ( $r = 0,370$ ), la turbidité aux Thomisiidae ( $r = 0,429$ ) et aux Simulidae ( $r = 0,532$ ), les MES aux Culicidae ( $r = 0,467$ ) et aux Sciomyzidae ( $r = 0,344$ ), la conductivité, les TDS et la dureté totale aux Sphercheidae (avec respectivement  $r = 0,450$ ,  $r = 0,347$ ,  $r = 0,458$  et  $r = 0,418$ ).

La teneur en oxygène dissous a été favorable aux Ephemerellidae et Anophelinae ( $r = 0,285$  et  $r = 0,343$ ). Si la concentration des eaux en  $\text{CO}_2$  dissous a été favorable aux Hydroscaphidae ( $r = 0,436$ ), il n'en a pas été le cas pour les Ephemerellidae ni Anophelinae ( $r = -0,290$  et  $r = -0,280$ ). La  $\text{DBO}_5$  a évolué dans le même sens que les Aeshnidae, Mesovellidae et Hydraenidae et ( $r = 0,287$ ,  $r = 0,341$  et  $r = 0,344$ ), mais elle a eu un effet contraire avec les Theriidae et Entomobryidae ( $r = -0,308$  et  $r = -0,338$ ).

Les nitrites et les nitrates ont été favorable aux Asellidae, Entomobryidae et Anophelinae ( $r = 0,380$ ,  $r = 0,357$ ,  $r = 0,307$  et  $r = 0,281$ ,  $r = 0,438$ ,  $r = 0,316$ ) respectivement. Par contre l'autre forme d'azote (ion ammonium) a favorisé positivement les Stenasellidae, les Sminthuridae,

Corixidae et Hydroptilidae ( $r= 0,308$ ,  $r= 0,338$ ,  $r= 0,289$  et  $r= 0,361$  respectivement). L'ion phosphate quant à lui était corrélé aux Sminthuridae ( $r= 0,379$ ) et Hydroscaphidae ( $r= 0,309$ ). La teneur en sulfates était favorable aux Hydroscaphidae ( $r= 0,465$ ) et Hydroptilidae ( $r= 0,312$ ) mais néfaste aux Hydraenidae ( $r= - 0,284$ ). Le Fer était corrélé aux Thomisiidae ( $r= 0,297$ ) tout comme le Fluor aux Hydroscaphidae ( $r= 0,334$ ), Hydroptilidae ( $r= 0,334$ ) et Sphercheidae ( $r= 0,284$ ).

#### Annexe 15

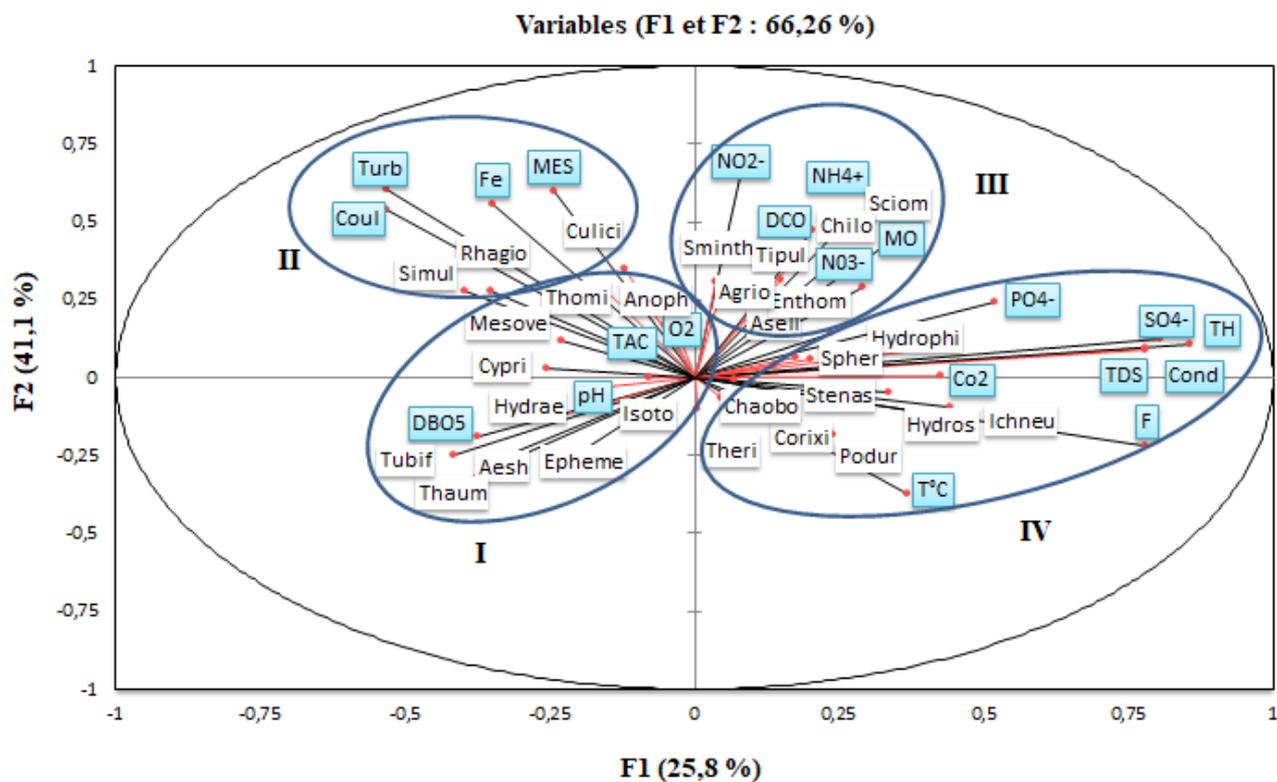
Les abondances de plusieurs groupes bactériens ont corrélés positivement aux groupes fauniques. C'était le cas de :

- la Flore mésophile aérobie totale avec Hydrosychidae ( $r= 0,351$ ), Dytiscidae ( $r= 0,294$ ) ;
- les Coliformes totaux avec Entomobryidae, Hydrosychidae et Dixidae ( $r= 0,466$ ,  $r= 0,407$  et  $r= 0,318$  respectivement);
- les Coliformes fécaux avec Entomobryidae ( $r= 0,371$ ) et Dytiscidae ( $r= 0,321$ ) ;
- *Staphylococcus aureus* a corrélé positivement aux Parasitidae, Hypogastridae et Dixidae ( $r= 0,301$ ,  $r= 0,400$  et  $r= 0,287$  respectivement);
- Enfin, *Salmonella* spp. est positivement lié à Parasitidae ( $r= 0,384$ ) et Entomobryidae ( $r= 0,330$ ).

#### **III.1.4.3.4. Projection des paramètres physicochimiques, fauniques et les stations sous l'ACP et l'ACH**

L'ACP réalisée sur la figure 64 entre les paramètres physicochimiques et la faune souterraine a montré quatre groupes :

- **Le groupe I** constitué de Epheme, Tubif, Aesh, Thaum, Hydrae, Isoto, Cypri, Mesove, Thomi et Anoph évoluent négativement ( $F_2 (-)$  et  $F_1 (-)$ ) avec les paramètres pH, TAC,  $O_2$  et  $DBO_5$  ;
- **Le groupe II** formé de Culici, Simul et Rhagio évoluent positivement et négativement ( $F_2 (+)$  et  $F_1 (-)$ ) avec les paramètres Coul, Turb, Fe, et MES ;
- **Le groupe III** formé de Assell, Enthom, Agrio, Tipul, Sminth, Chilo et Sciom évoluent positivement ( $F_2 (+)$  et  $F_1 (+)$ ) avec les paramètres MO, DCO,  $NO_2^-$ ,  $NO_3^-$  et  $NH_4^+$  ;
- **Le groupe IV** constitué de Hydrophi et Spher évoluent dans le même sens ( $F_1 (+)$ ) que les paramètres  $CO_2$ , TDS, Cond, TH,  $SO_4^-$  et  $PO_4^-$  ; par contre Theri, Chaobo, Stenas, Spher, Hydrophi, Podur, Hydras et Ichneu évoluent négativement avec la  $T^\circ C$  et la F.

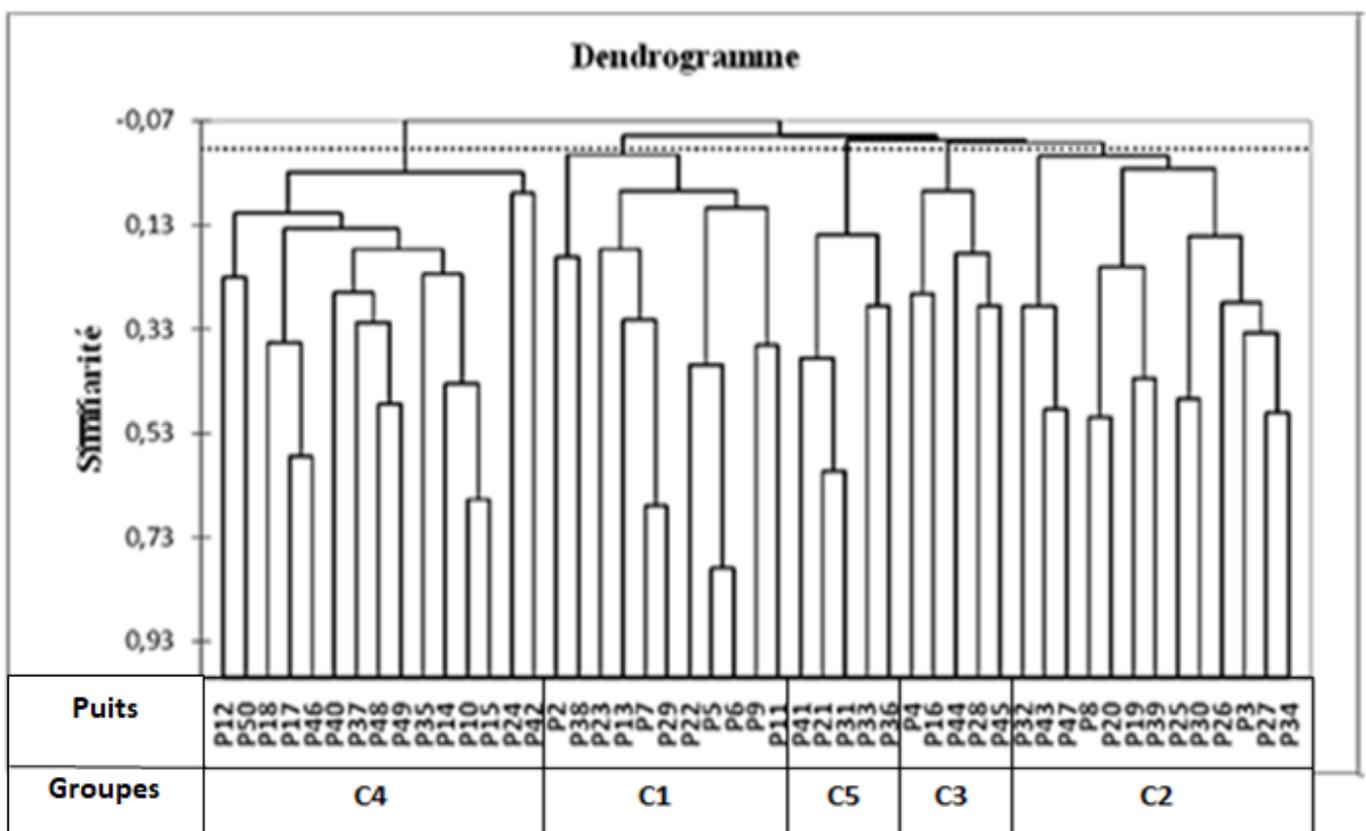


**Figure 64:** Projection des variables physicochimiques, fauniques et représentation des observations des stations sur le plan factoriel (F1×F2).

Aesh= Aeshnidae, Agrio= Agriotypidae, Anoph= Anophelinae, Asell= Asellidae, Corixi= Corixidae, Culici= Culiciadae, Cypri= Cypridae, Epheme= Ephemereididae, Entom= Entomobryidae, Hydræ= Hydraenidae, Hydros= Hydroscaphidae, Hydro= Hydroptilidae, Ichneu= Ichneumonidae, Isoto= Isothomidae, Mesove= Mesoveliidae, Podur= Poduridae, Rhagio= Rhagionidae, Sciom= Sciomyzidae, Simul= Simulidae, Sminth= Sminthuridae, Stenas= Stenasellidae, Spher= Sphercheidae, Thaum= Thaumaleidae, Theri= Theriidae, Tipul= Tipulidae, Tubif= Tubificidae, pH= Potentiel d'hydrogène, TAC= Alcalinité, O<sub>2</sub>= Oxygène dissous, CO<sub>2</sub>= Gaz carbonique, DBO<sub>5</sub>= Demande biochimique en oxygène pendant cinq jours, TDS= Solides totaux dissous, Cond= Conductivité électrique, TH= Dureté totale, F= Fluor, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>= Ion ammonium, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>= Nitrates, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>= Nitrites, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>= Sulfates, PO<sub>4</sub><sup>-</sup>= Orthophosphates.

L'ACH des paramètres physicochimiques et fauniques met en évidence cinq regroupements des points d'eau (Fig.65):

- **Le groupe 1** est constitué 12 puits (P1, P2, P5, P6, P7, P9, P11, P13, P22, P23, P29 et P38) ;
- **Le groupe 2** est formé de 13 puits (P3, P8, P19, P20, P25, P26, P27, P30, P32, P34, P39, P43 et P47) ;
- **Le groupe 3** rassemble 5 puits (P4, P16, P28, P44 et P45) ;
- **Le groupe 4** est constué de 15 puits (P10, P12, P14, P15, P17, P18, P24, P35, P37, P40, P42, P46, P48, P49 et P50) ;
- **Le groupe 5** est formé de 5 puits (P21, P31, P33, P36 et P41).



**Figure 65:** Dendrogramme représentant la classification ascendante hiérarchique des 50 stations décrites par les variables physicochimiques et fauniques de l'eau des puits étudiée.

### III.1.4.3.5. Répartition des Stenasellidae en Afrique

La répartition des Stenasellidae en Afrique est très inégale car la plupart des espèces ne sont connues que par leurs localités type. Les genres appartiennent à trois groupes géographiques principaux (Fig.66): un groupe rencontré dans la partie orientale du continent (Kenya et Somalie), un deuxième groupe est dans le nord-ouest de l'Afrique et la plupart étant située en Afrique occidentale; le troisième groupe est uniquement composé du genre *Metastenasellus* largement distribué en République Démocratique du Congo, en l'Algérie, au Nigéria et au Cameroun ((Lincoln, 1972 ; Magniez, 1979 et Magniez, 1986 ; Aït Boughrouss *et al.*, 2007 ; Merzoug *et al.*, 2011 et Zébazé *et al.*, 2013). Cette étude a permis de mettre les bases des données sur la biodiversité de la faune souterraine au Tchad et de signaler pour la première fois le genre *Metastenasellus* sp. au Tchad et à projeter leur étendu biogéographique en Afrique en générale et plus particulièrement en Afrique centrale (Fig.66).

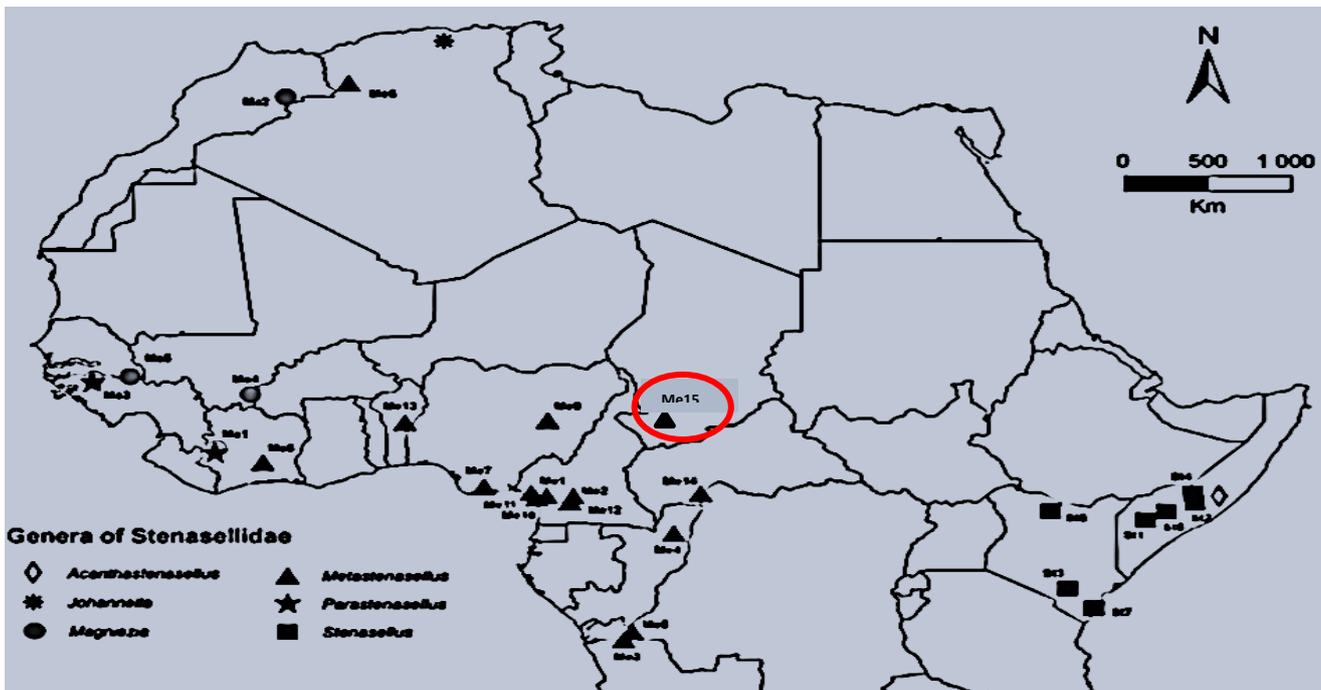


Figure 66: Distribution spatiale des Stenasellidae en Afrique :

*Acanthstenasellus* (*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, Me15: *Metastenasellus* sp du Tchad); *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*).

Source : Carte Pountounigni *et al.* (2021) modifiée

## III.2. DISCUSSION

### III.2.1. Impact de l'hydromorphométrie des puits sur la qualité des eaux étudiés

Les résultats de notre étude ont montré que la hauteur des différentes margelles a varié de 0.4 à 1m et les margelles les plus hautes des puits ont été celles en béton (1m). Parmi les cinquante puits étudiés, quarante-quatre (44) sont constamment ouverts, soit 88%, et les six (06) restants sont fermés, soit 12%. La profondeur des puits varie entre 0,79 et 27,70m. Le plus grand diamètre des puits a été de 1,70m (P4) situé dans le 4<sup>e</sup> arrondissement. La majorité des puits de la zone d'étude sont exempts de périmètres de protection et les margelles ; quand elles existent, elles sont plus ou moins planes. Ceci a été remarqué par Boubakar (2010) au Niger et Lakhdari (2014) en Algérie qui ont souligné que les troncs d'arbres, les pneus usés font parfois office de margelles. Les puits ont des parois non cimentées, de sorte qu'elles s'effritent facilement. Quelques couvercles rencontrés sont faits de matériaux en fer, en tôle ou en morceau de planche. Ces ouvrages, souvent mal protégés, accentuent fortement le degré de contamination de ces eaux beaucoup plus en saison des pluies. Nos résultats sont similaires à ceux de Maoudombaye *et al.*(2016) à Doba au sud du Tchad, qui signalent également une forte contamination des puits en état de dégradation pendant la saison des pluies.

Par conséquent, selon Vissin *et al.*(2016) au Bénin, les populations utilisent souvent l'eau des puits pour des raisons de proximité, de coût, mais ne prennent même pas la peine de la protéger et ignorent les risques de consommation dus à son environnement insalubre. Nana Nkemegni *et al.* (2017) ont également souligné que les paramètres hydromorphométriques des puits (profondeur, diamètre, épaisseur de la colonne d'eau, présence de couvercle) influencent la qualité d'eau. De même, cette situation a une conséquence très néfaste sur la santé, notamment celles des enfants de moins de 5ans (Bodering *et al.*, 2018 ; Ngaram *et al.*, 2021). Il s'agit surtout des quartiers situés dans les 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements où les interventions de la puissance publique sont très marginales. L'assainissement individuel est quelque fois pratiqué mais les risques des contaminations des eaux souterraines sont réels. En effet, les ménages situés dans les zones d'inondations sont plus exposés. Nous pouvons déjà affirmer par nos résultats que les ménages non raccordés aux réseaux d'eau potable sont plus exposés que les autres. A ce sujet, Allaramadji *et al.*(2020), soulignent que les eaux de boisson les plus contaminées sont celles des puits, tandis que la contamination de l'eau de robinet dépend surtout du type de stockage. C'est à ce juste titre que Vincent *et al.*(2009) soulignent que pour faire obstacle aux souillures venant de l'ouverture, un bon puits doit être équipé d'une

margelle et d'un couvercle, d'une dalle en ciment, d'un récipient de puisage bien propre et toujours accroché, et d'une clôture maintenant le bétail à distance.

### **III.2.2. Impact physicochimique, bactériologique et risques sanitaires de la qualité des eaux étudiées**

La température est le degré du froid et de la chaleur de l'eau. D'après la norme préconisée par l'OMS (2011), une eau de boisson doit avoir une température de 25°C. La température des eaux échantillonnées varie entre 27,20 et 30,35°C avec une moyenne de 28,77±0,77°C. Les eaux analysées ont des températures strictement supérieures à la norme recommandée. La forte température en saison sèche est due aux fortes évaporations des eaux. Elle correspond aux variations saisonnières de la température atmosphérique ambiante définies par les données météorologiques (29°C), qui règnent dans la ville de Moundou (Météo climat Moundou, 2019-2020). En effet, la température de l'eau est un facteur important dans l'environnement aquatique du fait qu'elle régit la presque totalité des réactions physiques, chimiques et biologiques (Chapman & Kimstach, 1996 ; Gbamélé *et al.*, 2020)

Le pH de l'eau a varié au cours de l'étude de 5,87 et 7,74 avec une valeur moyenne de 6,77±0,56. Ce qui montre que ces eaux sont en général acides durant les deux saisons. Les valeurs obtenues sont proches des résultats de Tchadanaye (2007) et Massang *et al.* (2015). Selon, Nola *et al.* (1998) la nature acide des eaux est due à celle du sol encaissant. Les valeurs de pH des eaux des puits obtenues sont conformes à la norme pour les eaux destinées à la boisson fixée entre 6,5 et 8,5 (OMS, 2011). Selon Rodier *et al.* (2009), de telles eaux acides ne sont pas à priori interdites pour la consommation humaine, bien que cette acidité leur confère un caractère corrosif sur le ciment ou des métaux de canalisation. En effet, l'acidité des eaux a été notée dans plusieurs provinces du pays. Il s'agit notamment de la Province de l'Ennedi-Ouest à l'extrême nord (Akoïna, 2017), la Province de N'Djaména au centre (Allaramadji *et al.*, 2020), dans la Province du Batha à l'Est (Lemoufouet *et al.*, 2020), et la Province du Logone Oriental au Sud (Ngaram *et al.*, 2021).

La mesure de la Conductivité électrique permet d'avoir une idée très approximative de la quantité des sels dissous dans l'eau, donc de sa minéralisation (Rodier *et al.*, 2009). Les valeurs de conductivité obtenues au cours de cette étude oscillent entre 187 et 6230 µS/Cm. En considérant la norme de l'OMS (2011), 50% des eaux de puits étudiés serait classées comme eaux de qualité médiocre, la valeur moyenne était de 1204,9±1125,6 µS/Cm étant supérieures à 1000 µS/cm. Ces valeurs importantes semblent être la conséquence des charges

de matières organiques endogènes et exogènes, génératrices de sels après décomposition et minéralisation et également avec le phénomène d'évaporation qui concentre ces sels dans l'eau, elles pourraient aussi être expliquées par la recharge des eaux des puits pendant la saison pluvieuse (Belghiti *et al.*, 2013 ; Dieng *et al.* 2017 ; Kadjangaba *et al.* 2018).

Les solides totaux dissous (TDS) représentent la concentration totale des substances dissoutes dans l'eau (Njitchoua *et al.*, 1997). Les valeurs de TDS obtenues montrent que les eaux de Moundou sont fortement minéralisées ; ces données sont corrélées positivement à la dureté totale ( $r = 0,784$ ), aux phosphates ( $r = 0,361$ ), aux sulfates ( $r = 0,694$ ) et au fluor ( $r = 0,548$ ). Des mesures effectuées dans les eaux souterraines de Maroua, au Cameroun, ont montré des variations des TDS entre 55,3 et 1430 mg/L (Moussa *et al.*, 2018), donc plus faibles que celles que nous avons obtenues à Moundou, soit fluctuant entre 122 et 3150 mg/L et entre 112,55 et 1576 mg/L respectivement pour la saison des pluies et la saison sèche. Les valeurs de teneurs en TDS obtenues tout au long de l'étude se situent pour certains puits en-deçà de la norme (500 mg/L) préconisée par l'OMS (2011), et pour d'autres puits largement au-delà de cette norme. D'après l'OMS (2011), les fortes valeurs des TDS de l'eau ne représentent pas un danger direct pour la santé du consommateur. Toutefois, de par leur composition probable, les eaux à teneurs élevées en TDS présenteraient un risque sanitaire important pour les consommateurs (Monjerezi & Ngongondo ; 2012, Malik & Slim-Shimi, 2019).

Les eaux analysées ont eu une turbidité variant de 0,7 à 80,80 FTU avec une moyenne de  $13,92 \pm 12,61$  FTU dans les quatre arrondissements de la ville de Moundou. Les eaux sont donc souvent restées turbides, avec des teneurs supérieures à 5 FTU, aussi bien en saison sèche qu'en saison pluvieuse ; ceci témoigne d'un fort enrichissement de ces eaux en matière organique à l'exception de celles du 2<sup>e</sup> arrondissement qui ont eu une turbidité moyenne 2,25 FTU en saison pluvieuse. Le manque de margelle et l'absence de fermeture des puits seraient à l'origine du taux élevé de leur turbidité. A cela s'ajoute le problème récurrent de débordement de Lac Wey, en saison pluvieuse, qui se déverse dans les puits du 1<sup>er</sup> arrondissement de la ville de Moundou. Asslouj *et al.* (2007) et Ben Abbou, *et al.* (2014) au Maroc ont également souligné l'augmentation de la turbidité due à l'impact des activités anthropiques.

Les concentrations en MES ont varié de 2,00 à 373 mg/L avec une moyenne de  $35,28 \pm 42,32$  mg/l. 88 % des puits de notre zone d'étude étaient constamment ouverts dont la hauteur moyenne de la margelle ( $0,55 \pm 0,10$  m) était inférieure à la norme fixée par l'OMS (2011). Les vents pourraient entraîner diverses particules volatiles dans ces puits non protégés par un couvercle. Cette forte concentration des eaux en matière en suspension pourrait s'expliquer par une forte dégradation de la matière organique présente dans les milieux aquatiques et traduirait le caractère très pollué des eaux des puits (Makoutode *et al.*, 2019).

Les eaux analysées ont montré une dureté totale variant entre 130 et 5900 mg/L  $\text{CaCO}_3$  avec la valeur moyenne de  $1502,10 \pm 1129,58$  mg/l. En se référant au taux normal recommandé (entre 10 et 15 mg/L), on peut conclure que les eaux des puits de Moundou sont très dures. Ce niveau élevé de la dureté totale pourrait s'expliquer par les échanges effectués pendant et après les précipitations. Ces eaux présentent de ce fait un risque de corrosion pour les ustencils de conservation (Essouli *et al.*, 2020)

Les teneurs en oxygène dissous se situent entre 18 et 89 % d' $\text{O}_2$  avec une moyenne de  $58 \pm 0,58$  % d' $\text{O}_2$ . Des faibles valeurs d'oxygène dissous ont été obtenues dans la plupart des eaux des puits. Plusieurs phénomènes permettent d'expliquer cette diminution : l'augmentation pendant la journée de la température, le ruissellement de l'eau qui engendre un brassage continu des eaux usées avec les eaux de puits et, par conséquent, un enrichissement en la matière organique (Senou *et al.*, 2017). A Moundou Les valeurs de ce paramètre se rapprochent de la norme de potabilité tout en restant inférieures, ce qui est un danger car selon Belghiti *et al.*(2013), les valeurs faibles de l'oxygène dissous favorisent le développement des germes pathogènes.

L'analyse des paramètres organiques a montré que la DCO a varié de 110 à 1563 mg/L d' $\text{O}_2$  avec une moyenne de  $526,92 \pm 284,70$  mg/l d' $\text{O}_2$ , et la  $\text{DBO}_5$  a oscillé entre 50,64 à 278,52 mg/L d' $\text{O}_2$  avec une moyenne de  $151,45 \pm 60,28$  mg/L d' $\text{O}_2$ . Les fortes valeurs de la DCO et de la  $\text{DBO}_5$  enregistrées pour les eaux des puits s'expliqueraient par un drainage excessif de matières organiques et inorganiques d'origine anthropique dans les puits. Il s'agit donc d'une synergie de pollutions domestique, urbaine et industrielle. A ce propos, Youmbi *et al.*(2013) et Houemenou *et al.* (2020) soulignent que les déchets domestiques non traités sont fortement chargés en matières organiques fermentescibles et augmentent la demande biochimique en oxygène des eaux de puits. Le rapport  $\text{DCO}/\text{DBO}_5$  a varié de 0 à 9,50 avec une moyenne de  $3,37 \pm 2,28$  mg/L d' $\text{O}_2$ . On a remarqué que pour la majorité des puits, ce

rapport était strictement supérieur à 0 car selon l’OMS, ce rapport doit être nul. Cette pollution organique constatée peut être liée au lixiviat des décharges publiques qui constitue le principal vecteur de transport de la pollution métallique issue des sites de stockage des déchets vers la nappe phréatique (Jourdan *et al.*, 2005 ; Er-Raioui *et al.*, 2011). La présence d’ammonium dans les eaux de puits est aussi attribuée à une dégradation de la matière organique par les micro-organismes, avec production de CO<sub>2</sub> (Nougang *et al.*, 2011).

La teneur en fer dans les eaux des puits analysées a respecté la limite prescrite par la norme de l’OMS soit 0,3 mg/L, excepté pour quelques puits pour lesquels cette teneur de (0,45mg/L) était légèrement supérieure à la norme. Nos résultats viennent infirmer ceux de Massang *et al.* (2015) qui ont trouvé dans l’eau du fleuve Logone à Moundou une teneur en fer supérieure (0,7 mg/L) à celle de la norme et ont conclu que cette teneur en fer similaire entre les points d’échantillonnage, devrait avoir une origine pédologique. La présence de fer dans l’eau des puits étudiés a favorisé la prolifération de certaines souches bactériennes qui ont précipité le fer et ont corrodé les fûts utilisés comme margelle.

Les Orthophosphates ont été détectés dans les échantillons d’eau étudiés à des concentrations moyennes :  $48,93 \pm 54,06$  en saison des pluies et  $75,56 \pm 27,9$  en saison sèche. Ceci serait révélateur d’une pollution d’origine organique engendrée par une contamination possible de l’eau par les rejets de l’élevage et des eaux urbaines, ou une autre source liée à l’agriculture pratiquée dans les quartiers reculés de la ville (3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements). Ces résultats s’apparentent à ceux de Yapo *et al.* (2016) enregistrés pour les eaux des puits à usages maraîchère et domestique à Korhogo en Côte d’Ivoire. Dans le même ordre d’idée, EL Haissoufi *et al.* (2011) ont trouvé des valeurs similaires des ions PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> dans les eaux de puits de certains quartiers de la ville de Fes, au Maroc.

Relativement aux valeurs de l’Indice de Pollution Organique (IPO) obtenues en utilisant les résultats d’analyses des paramètres indicateurs de pollution (DBO<sub>5</sub>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), il en ressort que les eaux des puits étudiées dans la ville de Moundou avaient une pollution organique faible mais surtout modérée. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Bahroun *et al.* (2011) dans quelques puits naturels en Algérie, où le niveau de pollution était modéré à nul. L’évaluation des eaux des puits de la ville de Moundou par l’Indice de la Qualité des eaux Souterraine (IQES) a montré que ces points d’eaux sont tous influencés par les apports exogènes, puisque l’IQES était égal à 5626,60 donc supérieur à 100. Ces données indiquent que ces eaux de puits sont impropres à la consommation. Ceci serait le reflet du

faible niveau de collecte des ordures ménagères (1), des mauvais comportements des populations jettant les eaux usées à la rue (2), et de l'absence des stations de traitement des eaux usées communales dans la ville de Moundou (3).

La pollution des eaux souterraines est donc non seulement influencée par la nature du terrain et des différents processus hydrochimiques entre les éléments présents dans les aquifères (Nola *et al.*, 1998) mais aussi par l'impact anthropique (Moussa *et al.*, 2018).

La concentration moyenne de la flore mésophile aérobie totale (FMAT) pour tous les puits pendant les deux saisons d'étude a varié entre 67 et  $30.10^2$  UFC/mL avec une moyenne de  $627 \pm 560$  UFC/mL. Cette FMAT a en générale été très abondante dans presque tous les puits pendant la saison sèche.

L'analyse des échantillons d'eau a montré que la densité des coliformes totaux (CT) a oscillé entre 3 et  $7.10^2$  UFC/mL avec une moyenne de  $171 \pm 170$  UFC/mL. En se référant à la norme de l'OMS (2011) il s'avère que pour toutes les eaux analysées la densité en CT a dépassé la norme de référence requise. Le nombre de CT a été très élevé pendant la saison sèche du fait de la sédimentation, et d'une baisse de niveau piézométrique pendant la saison sèche (mai et novembre), se traduisant par une concentration des germes au niveau inférieure des puits. De même, la forte température  $28,77 \pm 0,07^\circ\text{C}$  a contribué à expliquer cette situation (Moussa *et al.*, 2011). Par contre, une diminution de la concentration bactérienne a été notée pendant la saison des pluies (juillet et août). Elle serait expliquée par les conditions pluviales qui peuvent avoir un rôle de dilution dans la nappe phréatique, et par conséquent, diminuer la concentration bactérienne dans l'eau pendant la saison pluvieuse (Bahir *et al.*, 2002 ; Lalanne, 2012). Cette diminution de la concentration bactérienne pendant la saison des pluies pourrait également être liée à l'infiltration de certaines substances qui inactivent les germes de l'eau (Nola *et al.*, 2002 ; Moussa *et al.*, 2010). Les données des paramètres organiques avec des rapports des valeurs de DCO/DBO<sub>5</sub> non nuls dans la majorité des eaux de puits confirment effectivement cette contamination. Selon Sherer *et al.*(1992) une remise en suspension des particules est généralement accompagnée d'une augmentation de l'abondance bactérienne dans le milieu et une forte corrélation positive entre les MES et les bactéries traduiraient une symbiose métabolique ou une libération des microorganismes dans le milieu. Par ailleurs, les corrélations négatives trouvées entre différentes variables bactériologiques traduiraient une compétition entre les microorganismes.

En comparant les nombres moyens de Coliformes fécaux (CF) obtenus dans les eaux analysées à la norme de l'OMS (2011), on déduit qu'une pollution microbiologique des eaux de puits de la ville de Moundou est manifeste. Ces germes sont d'origine animale ou humaine ; leur présence dans l'eau indique une contamination récente par des matières fécales (Chippaux *et al.*, 2002). Il est connu que le germe la plus fréquemment associée à ce groupe bactérien est *Escherichia coli* ; c'est un indicateur de la contamination fécale (Elmund *et al.*, 1999 ; Ederg *et al.*, 2000). Les Coliformes fécaux ont été présents dans les eaux de puits de la ville de Moundou à une concentration moyenne de  $86 \pm 87$  UFC/mL. La norme OMS (2011) ne tolérant aucune présence de ces germes d'eau, on déduit que ces eaux sont impropres à la consommation humaine. Nos résultats corroborent ceux de Nola *et al.*(2002), Djuikom *et al.*(2009), Moussa *et al.* (2010) et Mbawala *et al.* 2010) réalisés respectivement à Yaoundé, Douala, Ngaoundéré au Cameroun. Ces auteurs ont révélé une contamination fécale due à une présence individuelle ou associée des Coliformes totaux, des Coliformes thermotolérants, des Entérocoques fécaux dans les eaux de puits.

Le nombre d'*Echerichia coli* a varié au cours de notre étude entre 0 et 68 UFC/mL avec une moyenne de  $11 \pm 12$  UFC/100mL. La présence de cette espèce dans les eaux de Moundou témoignait d'une contamination récente des puits dont les sources seraient la divagation d'animaux (chiens, chèvres, porcs, bœufs, poules) observée aux alentours de nos stations. Ce qui expliquerait le manque criard des fosses septiques étanchées et la multiplication du péril fécal dans la zone d'étude (UNICEF-EDS-MICS, 2019). Aussi, la mise en évidence des Coliformes fécaux (*E. coli*) et/ou des entérocoques dans les eaux analysées indique une contamination par des matières fécales venant d'un fumier, d'une fosse septique ou des latrines. Cette pollution apparaît plus marquée dans les eaux de puits non aménagés proviendrait des latrines, des eaux usées, du niveau superficiel de l'eau et des déchets solides qui avoisinent les puits. Nos résultats confirment l'étude récente menée sur la qualité bactériologique des eaux de puits du bassin pétrolier de Doba au Tchad, qui ont signalé la contamination notoire par *E. coli* de ces eaux (Maoudombaye *et al.*, 2016). Certaines localités de la zone d'étude sont sujettes à de fréquentes inondations, qui accentuent les conditions précaires d'hygiène et d'assainissement. La typologie de l'habitat dans nos villes, rend difficile l'assainissement des eaux usées (Tamungang *et al.*, 2016). Cette pollution microbiologique de ces eaux montre d'énormes risques sanitaires pour les habitants et rend lesdites eaux contaminées impropres à la consommation humaine (Dovonou *et al.*, 2017).

Les résultats de l'analyse bactériologique des eaux ont révélé que la totalité des eaux des puits prélevées étaient contaminées par *Staphylococcus aureus* pendant la saison sèche. L'abondance de *Staphylococcus aureus* dans ces eaux montre que leur contamination est causée par la proximité des toilettes et par l'infiltration des eaux de surface dans les puits. Il est essentiel de faire remarquer que la majorité des puits étant construits sans margerelle ni couvercle, les eaux des pluies et de ruissellement charriant divers déchets (matières fécales) s'y déversent très facilement. Ces eaux des puits sont puisées à l'aide de seaux, de bidons ou de marmites attachées à des cordes abandonnées à même le sol, ce qui favorise leur contamination lors du puisage. Ces résultats corroborent ceux de Maoudombaye *et al.* (2016) selon lesquels, les eaux des puits de Doba étaient plus polluées par rapport aux eaux de rivières et des sources.

La charge bactérienne en *Salmonella* spp. a fluctué de 0 à 116 UFC/100mL d'échantillon, une augmentation des *Salmonella* spp. était notable en saison de pluie. Les études de Benodji (2012) et Nang-yana (2013) ont montré également que la qualité bactériologique et/ou chimique des eaux souterraines était plus mauvaise pendant la saison des pluies. En cette saison, l'augmentation du niveau piézométrique concentre davantage les polluants se trouvant sur le sol ou piégés dans la zone insaturée (Bricha *et al.*, 2007 ; Mba *et al.*, 2019). Les eaux d'infiltration venant des fosses septiques, des latrines non étanches augment la pollution (Hounsinou *et al.*, 2015) en atteignant les puits (Mpakam *et al.*, 2009 ; Hounsinou *et al.*, 2015). Ce phénomène est lié à la recharge de la nappe phréatique ceci par les eaux de ruissellement pendant et après les précipitations, par l'exposition directe des puits aux rejets des eaux usées et celles des fosses septiques du fait des mauvais état de protection des puits dont la majorité sont ouverts (Degbey *et al.*, 2011 ; Yapo *et al.*, 2010). En effet, les puits mal construits et mal entretenus sont fortement exposés au risque de contamination (Boubakar, 2010). Nola *et al.* (1998) ont aussi argué que l'abondance de ces germes dans les eaux des puits pourrait être due à une pollution locale ponctuelle ayant sa source en surface, au niveau même des points d'eau ou à proximité. D'autres études réalisées sur les eaux souterraines et de surfaces en zone urbaines et périurbaines tchadienne ont montré que ces eaux sont de mauvaise qualité et qu'elles hébergent des germes témoins de contamination (Dionkas, 2015, Maoudombaye *et al.*, 2016).

Nos résultats microbiologiques ont indiqué que les eaux étudiées abritaient de nombreuses bactéries pathogènes : Coliformes totaux (CT), Coliformes fécaux (CF)

*Escherichia coli* (E.c) et *Salmonella* spp. Nos résultats montrant une augmentation de la charge bactérienne en saison sèche et une régression du nombre de bactéries en saison de pluie se rapprochent de ceux de (Boubakar, 2010 ; Benajiba *et al.*, 2013). Les différences de concentration de certains germes entre la saison sèche et la saison pluvieuse est due au fait que des ménages ont déclaré traiter l'eau avant de la consommer, et surtout en saison pluvieuse. Ceci pourrait également s'expliquer par les résultats des paramètres hydromorphométriques des puits qui ont montré un faible niveau de protection marquée par l'absence de couvercle (86%) sur la majorité des puits couplée aux mauvais états des margelles les exposant à tous types de pollution. D'autre part, cette mauvaise qualité des eaux des puits de la ville de Moundou pourrait également être causée par des activités anthropiques, notamment les rejets des déchets domestiques et industriels (Égoûts de la CotonTchad et de la Brasserie), ainsi que le mauvais assainissement et l'hygiène des points d'eaux (Santé et Bien-être social Canada, 1982 ; Bengoumi *et al.*, 2015; Bodering *et al.*, 2018)

### **III.2.3. Faune souterraine et bio-indicateurs de la qualité des eaux des puits étudiés**

La faune des puits des 50 stations étudiées s'est caractérisée par la dominance des espèces aquatiques épigées, c'est-à-dire d'origine externe, par rapport au très faible nombre d'espèces stygobies, espèces souterraines dont le cycle de vie se déroule toujours et entièrement dans la nappe phréatique. Ce résultat illustre le fait que, comme l'avaient déjà montré Vandel (1964) et Dalmas (1972 ; 1973), les puits sont des écotones où deux communautés cohabitent, des espèces épigées et endogènes. Les puits sont bien alimentés par les eaux souterraines mais sont beaucoup moins protégés des apports extérieurs que la nappe phréatique elle-même. Une faune riche et diversifiée dans les puits a été notée dans cette étude. La liste des espèces aquatiques recensées est encore provisoire et certainement incomplète car de nombreux taxons n'ont pas encore pu être déterminés au niveau de l'espèce, et il est probable qu'elles renferment plusieurs genres distincts, voire des espèces dont la systématique ainsi que la signification écologique mériteront d'être précisées.

Nos résultats de 91 morphotypes identifiés au rang de la famille sont supérieurs à ceux obtenus dans les eaux de puits par Tuekam Kayo *et al.* (2013) (49 et 63 morphotypes) respectivement à Yaoundé et Douala, Nana Nkemegni *et al.* (2017) (80 morphotypes) dans les hauts plateaux Bamoun. Pour cette différence de résultats, Boutin (1987), Zébazé *et al.* (2011) et Merzoug *et al.* (2011) soulignent que la biodiversité, évaluée en termes de la richesse taxonomique, varie en fonction de la qualité des eaux souterraines. A ce sujet, (Boutin, 1987; Dias, 1987; Fakher, 1999 et Aït Boughrouss *et al.*, 2007) avait émis l'idée que

ces organismes stygobies peuvent être utilisées comme bioindicateurs permettant de classer l'écosystème aquatique souterrain comme étant sain (par leur présence) ou au contraire pollué (par leur absence).

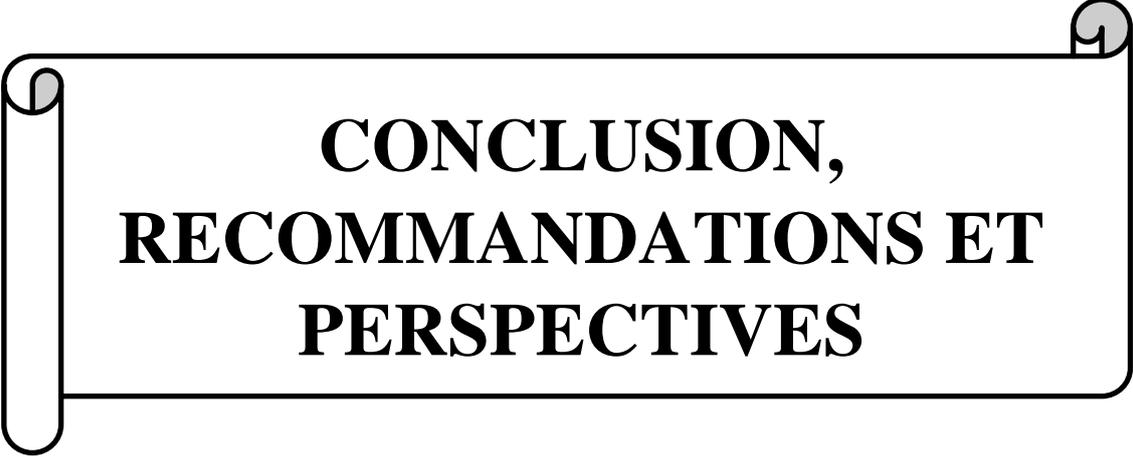
La prédominance numérique des organismes épigés dans les eaux des puits étudiées, à savoir les Coléoptères (Dytiscidae, Gyrinidae) et les Hémiptères (Gerridae, Veliidae) qui sont d'excellents prédateurs, s'expliquerait aussi par le grand nombre des proies (oligochètes) dans l'eau. Selon Tachet *et al.* (2010), de tels prédateurs sont souvent à l'affût et se nourrissent des vers et des larves d'autres insectes aquatiques. Nous avons noté un nombre important des organismes polluo-résistants comme les Oligochètes (Tubificidae, Naïdidae), les Copépodes, les Ostracodes et les gastéropodes dans nos échantillons d'eaux ; ceci indique que ces eaux sont fortement polluées. Ces organismes sont connus pour leur capacité à tolérer des conditions défavorables telles qu'une faible teneur en oxygène et de fortes concentrations de polluants (Slepukhina, 1984 ; El Alami El Filali, 2010). A cela, s'ajoute la densité des larves de Diptères. Toutes ces espèces fournissent de précieuses indications sur le degré de dégradation de la qualité des eaux où elles sont récoltées (Moustaine *et al.*, 2013 ; Louze & Bendaira, 2018). Cette pollution des eaux des puits de la ville de Moundou est illustrée par les présences des espèces sensibles à la pollution telles que les trichoptères, les plécoptères et les éphéméroptères qui étaient constamment absents dans nos échantillons d'eaux récoltés. A ce titre, Boulal *et al.* (2017) soulignent que la fréquence et la distribution de la faune souterraine changent fréquemment en réponse au stress de la pollution. C'est la base du développement de critères biologiques pour évaluer les influences anthropiques (Nedeau *et al.*, 2003 ; Boyle *et al.*, 2003). C'est dans ce sens que Gray (1989) a résumé les réponses en trois catégories distinctes : réduction de la diversité, domination accrue par une seule espèce ou un groupe d'espèces opportunistes, et réduction de la taille des individus. La différence de densité d'espèces trouvée dans les stations indique des conditions environnementales distinctes du milieu. Selon Kerans *et al.* (1992), les espèces individuelles peuvent varier en densité de population pour une grande variété de raisons (variations naturelles des facteurs biotiques et abiotiques).

En ce qui concerne la communauté stygobiontique récoltée dans les eaux des puits de la ville de Moundou, cette faune contenait des représentants de crustacés Isopodes (famille des Stenasellidae et genre *Metastenasellus*) rapportés pour la première fois au Tchad. Ce genre d'isopodes est présent dans de nombreuses régions d'Afrique tropicale et équatoriale,

notamment au Cameroun (Zébazé *et al.*, 2013), au Nigéria (Lincoln, 1972 ; Magniez, 1979) et même au nord du Sahara (Magniez, 1986 ; Aït Boughrouss *et al.*, 2007 ; Merzoug *et al.*, 2011).

Les différences faunistiques observées entre les stations pourraient s'expliquer par des variations locales de la qualité physicochimique de l'eau, et être liées aux sources de pollution de surface et d'infiltration qui affectent localement les puits, et donc à l'impact des différentes activités anthropiques en surface.

Enfin, la faible présence ou l'absence des organismes sensibles (Stenasellidae) et la forte présence des organismes polluo-tolérants (Tubificidae, Naitidae) ont montré la pollution de certains puits de la ville de Moundou. Dix-huit (18) des cinquante (50) stations soit 36% ont livré des *Metastenasellus* au cours de cette étude, et sont situées dans les quartiers les moins pollués. Etant donné le nombre moins élevé (62) d'individus de *Metastenasellus* capturés dans 18 puits moins pollués de la ville de Moundou, incite à envisager l'hypothèse que cette espèce serait plus sensible à la pollution. *Metastenasellus* sp., serait donc un bon marqueur de la qualité de l'eau. Cependant, cette hypothèse reste encore à tester en laboratoire, pour mettre en place un protocole fiable permettant des expériences comparables à celles réalisées par Boutin *et al.* (1997) ou par Fakher *et al.* (1998). Ces résultats sont également en accord avec l'hypothèse émise par Zébazé Togouet (2004) d'une relation positive entre la présence des stygbiontes et la qualité des eaux souterraines. Ceci a été clairement observé dans cette étude, confirmant l'intérêt des espèces stygobies, et dans une moindre mesure, de la richesse globale en espèces, comme indicateurs de la qualité des eaux de puits. On peut donc ne pas exclure que la répartition des espèces de crustacés dépend d'autres facteurs que la qualité de l'eau, comme les caractéristiques granulométriques des sédiments aquifères par exemple.



**CONCLUSION,  
RECOMMANDATIONS ET  
PERSPECTIVES**

## CONCLUSION

A travers les résultats des données *in situ*, des analyses au laboratoire et les mesures hydromorphométrique des puits, il se dégage quelques connaissances édifiantes qui ont conduit à la compréhension de l'impact de la pollution anthropique sur la qualité des eaux de puits consommées et les risques sanitaires parcourus par la pollution de la ville de Moundou.

Du point de vue paramètres hydromorphométriques des puits, qualité physicochimique et bactériologique, les eaux des puits de la ville de Moundou sont fortement influencées par certains paramètres hydromorphométriques (absence de couvercle, la hauteur de la margelle et la distance avec les latrines). Ces eaux sont acides, fortement minéralisées, peu oxygénées, très turbides, ont des températures très élevées, présentent une pollution organique modérée et une forte contamination bactérienne pendant les deux saisons. Cette étude a révélé des souches résistantes d'*Escherichia coli* et de *Salmonella spp.* au moins à un antibiotique testé. Cependant, ces eaux des puits ont été sensibles à la Gentamicine à 100 % pendant les deux saisons. Ces eaux sont donc impropres à la consommation humaine et leur utilisation par les populations sans traitement préalable peut entraîner des risques sanitaires.

Les corrélations entre les paramètres hydromorphométriques, physicochimiques d'une part et bactériologiques des eaux échantillonnées d'autre part ont montré que 14 puits sur 50 soit 28% montrent une contamination bactérienne non négligeable par tous les germes et une forte turbidité en liaisons directes avec des apports exogènes d'origines anthropiques (déchets domestiques, municipales et effluents de toute sorte). La densité bactérienne a été positivement corrélée avec le niveau piézométrique et la hauteur de la margelle. Plusieurs groupes bactériens ont été positivement corrélés entre eux. De plus, des corrélations significatives et positives ont été obtenues entre, l'oxygène dissous, la DBO5 et la biologie.

Les tests de similarité (ACP et ACH) des stations en fonction des paramètres hydromorphométriques, physicochimiques et biologiques ne révèlent pas une grande dissemblance entre les groupes formés.

La faune souterraine des eaux des puits de la ville de Moundou est constituée de 91 familles avec une faible diversité observée dans les 1<sup>er</sup> et 2<sup>e</sup> arrondissements, mais les 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> arrondissements restent les plus diversifiés avec une meilleure répartition des organismes.

<b>ARRONDISSEMENTS</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>
<b>ABONDANCE TOTALE</b>	4284	2342	6973	19789
<b>RICHESSSE SPECIFIQUE</b>	39	45	66	93

Le genre *Metastenasellus* signalé pour la première fois au Tchad, à projeter son étendu biogéographique en Afrique. Ce genre *Metastenasellus* constituerait ainsi un outil supplémentaire d'analyses physicochimique et bactériologique, utile pour évaluer la qualité des eaux souterraines, une alternative moins coûteuse. Ces informations sont très importantes pour servir d'étude de base pour le Tchad afin d'informer les décideurs publics des conditions et de la façon dont l'utilisation des bioindicateurs peut aider à la surveillance et la gestion durable de l'environnement.

## **RECOMMANDATIONS**

Au terme de cette étude, nous recommandons ce qui suit aux :

### **Pouvoirs publics :**

- ✓ L'extension du réseau d'adduction en eau potable dans toute la ville de Moundou afin d'éviter les problèmes liés à la consommation d'eau 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 ;
- ✓ sensibiliser les acteurs aux risques liés à l'antibiorésistance et à la nécessité de préserver l'efficacité des antibiotiques ;

### **Chercheurs :**

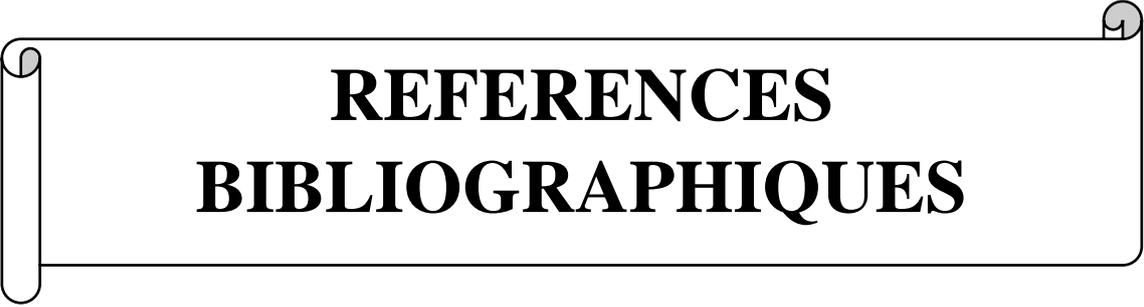
- ✓ Étendre l'étude détaillée sur la faune souterraine dans tout le Tchad ;
- ✓ effectuer des études sur une période plus longue accompagnée d'enquêtes sur la situation sanitaire auprès des résidents dans tout le Tchad afin de suivre l'état de pollution des eaux de consommation (puits, forages), la dissémination de la résistance aux antibiotiques dans l'environnement et son impact sur la santé publique.

## **Populations :**

- ✓ La construction des puits avec margelle haute (0,5 à 1m) respectant les normes de l'OMS et à 15 m au moins de toute formes de pollutions ;
- ✓ étanchéifier le sol dans un diamètre de 2m autour des puits, la pente vers l'extérieur ;
- ✓ le traitement de l'eau à l'échelle familiale par filtration, ébullition et SODIS avant toute consommation ;
- ✓ le ramassage des ordures doit être de mise ;
- ✓ consulter toujours un médecin avant de pratiquer l'antibiothérapie.

## **PERSPECTIVES**

- ✓ Réaliser les analyses moléculaires des espèces *Metastenasellus* sp. issues de cette d'étude, afin d'approfondir notre étude sur la morphologie et la systématique ;
- ✓ faire des analyses biomoléculaires (PCR) pour caractériser les souches des *Salmonella* sp. et *Escherichia coli* isolées ;
- ✓ effectuer un travail taxonomique pour l'identification d'autres organismes issus de notre étude au niveau des espèces ;
- ✓ effectuer un travail taxonomique pour l'identification d'autres organismes issus de notre étude au niveau des espèces ;
- ✓ effectuer des recherches sur les risques de l'utilisation des pneus dans la majorité des cas comme margelle des puits.

A decorative horizontal scroll graphic with a black outline and rounded ends, containing the text. The scroll is positioned in the center of the page.

**REFERENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**

- Adjagodo A, Agassounon DTM, Kelome NC & Lawani R (2016).** Flux des polluants liés aux activités anthropiques, risques sur les ressources en eau de surface et la chaîne trophique à travers le monde : synthèse bibliographique. *International Journal of Biologiactal and Chemical Sciences*, 10(3):1459-1472
- Afonso O (1987).** Contribution pour la connaissance des rapports entre la qualité de l'eau phréatique et les communautés d'Asellides (Crustacea, Isopoda, Asellota). *Publication de l'Institut de Zoologie de la faculté des Sciences de Porto*, 198: 6p.
- Afonso O (1991).** Ecological characterisation of the phreatic waters surrounding a polluted coastal lagoon (Barrinha de Esmoriz, Portugal). *Mémoire de Biospéologie*, 18: 67-74.
- Afonso O (1992).** Phreatic waters of Cavado basin (Northern Portugal), Faunistics, physico-chemical and bacteriological characterisation. *Publication de l'Institut de Zoologie de la faculté des Sciences de Porto*, 230 : 21p.
- Agassounon Djikpo Tchibozo M, Ayi-Fanou L, Lozes E, Fadonougbo R, Anago GDJ, Agbangla C & Ahanhanzo C (2014).** Impacts sanitaires liés à l'usage des eaux de puits, à l'assainissement et à l'aménagement à Gbôdjê dans l'arrondissement de Godomey au Bénin. *International Journal of Biologiactal and Chemical Sciences*, 6(2): 592-602.
- Ahmat al-Tidjani H, Kamga R & Tchadanaye NM (2015).** Physico-chemical analysis of Logone River water at Moundou City in Southern Chad. *International Journal of Biologiactal and Chemical Sciences*, 9(3):1654-1664.
- Ahonon AS (2011).** *Evaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de surface dans les zones montagneuses du sud-ouest du Togo: cas du canton de la vie.* Mémoire de master option environnement-eau-santé. Université de Lomé (Togo). 47p.
- Ahoudi H, Gnandi K, Tanouayi G & OuroSama K (2015).** Caractérisation Physicochimique et Etat de pollution par les éléments traces métalliques des eaux souterraines de Lomé (Sud Togo) : cas du quartier Agoe Zongo. *Larhyss Journal*, 24: 41-56.
- Aissata BH (2010).** *Aquifères superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique: Cas de la communauté urbaine de Niamey (NIGER).* Thèse de Doctorat, Hydrologie, Université Abdou Moumouni, 250p.
- 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, 236p.

- Aït Boughrous A, Yacoubi Khebiza M, Boulanouar M, Boutin C & Messana G (2007).** Qualité des eaux souterraines dans deux régions arides du Maroc : impact des pollutions sur la biodiversité et implications paléogéographiques. *Environmental Technology*, 28:1299-1315.
- Akoïna M (2016).** *Utilisation de l'hydrochimie et des traceurs de l'environnement (<sup>18</sup>O et <sup>2</sup>H) pour la caractérisation de l'origine des eaux souterraines, estimation de la recharge moderne dans la zone montagneuse de l'Ennedi.* Mémoire de Master d'Hydrogéologie, Faculté des Sciences Exactes et Appliquées, Université de N'Djaména, 83p.
- Alborn W, Allen N & Preston D (1991).** *Deptomycin disrupts membrane potential in growing Staphylococcus aureus.* *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*. 3:1093-1099.
- Allaramadji BB, Hongping W & Xia J (2020).** Analysis and Control of the Physicochemical Quality of Groundwater in the Chari Baguirmi Region in Chad, *Water*, 12 (282): 1-18
- American Public Health Association (1998).** *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater.* 5<sup>th</sup> edition, Washington District of Columbia, 1150p.
- Argano R (1994).** Isopoda terrestria: Oniscidea. In. C. Juberthie & V. Decou. (eds) *Encyclopedica Biospeologica*, T.1. Société de Biospéologie. Moulis-Bucarest, 141-146p.
- Artheau M (2002).** *Un regard sur les écosystèmes aquatiques souterrains, étude préliminaire de la faune de puits et résurgences du Roussillon.* Mémoire de DEA de l'Université Paul Sabatier Toulouse France, 24p.
- Asslouj JE, Kholtei S, Amrani-Paaza NE & Hilali A (2007).** Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines de la communauté Mzamza (Chaouia, Maroc). *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 20(3) : 309-321.
- Association pour la protection de l'Environnement du Lac, APEL (2014).** Revue de la littérature sur l'impact des systèmes d'assainissement décentralisés sur la qualité des eaux de surface- Implications pour le lac Saint-Charles, Québec, 32p.
- Association Santé Environnement France (2010).** Pollution de l'eau : Origines et impacts, 5p.
- Aubry P & Gaüzère BA (2012).** Les maladies liées à l'eau, Médecine et Santé Tropicale, 7p.
- Bahir M, Mennani A, Jalal M & Fakir Y (2002).** Impact de la sécheresse sur les potentialités hydriques de la nappe alimentant en eau potable la ville d'Essaouira

- (Mogador, Maroc). Notes méthodologiques. *Science et Changements Planétaires/Sécheresse*, 7p.
- Bahroun S & Kherici B.H. (2011).** Évaluation de l'indice de pollution organique dans les eaux naturelles cas de la région d'el tarf (Nord-Est Algerien). *Larhyss Journal*, (09):171-178
- Balloy Mwanza P, Katond JP & Hanocq P (2019).** Evaluation de la qualité physico chimique et bactériologique des eaux de puits dans le quartier spontané de Luwowoshi (RD Congo), *Tropicultura*, 2(37): 2295-8010
- Banton O & Bangoy LM (1997).** *Hydrogéologie, multiscience environnementale des eaux souterraines*. Saint Foy (éd.), Québec : PUQ/AUPELF, 460 p.
- Barbour MT, Gerritsen J, Snyder BD & Stribling JB (1999).** Rapid bioassessment protocols for use in stream and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish. 2<sup>nd</sup> edition, U. S. Environmental Protection Agency, *office of water, Washington, District of Columbia*, Environmental Protection Agency 841-B-99-002. 11 chapters and 4 appendices, 664p.
- Barthélémy D (1984).** *Impact des pollutions sur la faune stygobie karstique : Approche typologique sur 16 émergences des départements de l'Ain et du Jura*. Thèse Doctorat Spécialisé. Université de Lyon I, 175p.
- Bauer AJ, Kirby WMM, Sherris JC & Turck M (1966).** Antibiotic susceptibility testing by a standardized single disk method. *American Journal of Clinical Pathology*, 45: 493-496.
- Belajal C & Hmidi W (2021).** *Synthèse sur la pollution des écosystèmes aquatiques*. Mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar-El Oued, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, 83p.
- Belghiti ML, Chahlaoui A, Bengoumi & El Moustaine R (2013).** Etude de la qualité physicochimique et bactériologique des eaux souterraines de la nappe paléo-quaternaire dans la région de Meknès (Maroc), *Larhyss Journal*, 14, 21-36
- Ben Abbou M, Fadil F, El Haji M & Zemzami M (2014).** Impact anthropique sur la qualité des eaux souterraines du bassin versant de l'Oued Taza (Maroc). *European Scientific Journal*, 10(5): 1857-7881
- Benajiba MH, Saoud Y, Lamribah A, Ahrikat M, Amajoud N & Ouled-Zian O (2013).** Evaluation de la qualité microbienne des eaux de la nappe phréatique de Martil au Maroc. *Revue des Sciences de l'Eau / Journal of Water Science*, 26(3): 223-233.

- Bengoumi D, Chahlaoui A, Belghiti L, Taha I, Samih M & El Moustaine R (2015).** Etude de la qualité bactériologique de l'eau de certains puits dans les élevages avicole (Meknes et Gharb-Maroc), *Larhyss Journal*, 24: 209-226
- Benodji B (2012).** *Caractérisation physico-chimique et bacteriologique des eaux dans le bassin versant de Boutalbagara à N'Djaména (Tchad)*. Mémoire de Master, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I. 85p.
- Benzécri JP (1973).** « La place de la priori » *Encyclopedia Universalis*, Organum (17):11-24
- Bergdoll MS (1991).** Symposium on microbiology update: old friends and new enemies. *Staphylococcus aureus. Journal of Association of Analytical Communities International*, 74:706 -710
- Bettati M (2012).** *Le droit international de l'environnement*, Edition Odile Jacob, 37p.
- Billon B, Herbeau J & Oberlin G (1974).** Le bassin du fleuve Chari. *Monographie hydrologique* N°2 ORSTOM, Paris, 450p.
- Blum A, Chery L, Barbier J, Baudry D & Petelet-Giraud E (2002).** Contribution à la caractérisation des états de référence géochimique des eaux souterraines. Outils et méthodologie, Rapport BRGM/RP-51549-FR, 519p.
- Bodering A, Ndoutamia G, Ngandolo BN, Mopate LY & Ngakou A (2018).** Caractéristiques des élevages avicoles et évaluation de leur niveau de contamination par *Salmonella* sp. et *Escherichia coli* dans les villes de N'Djamena et Doba au Tchad. *Revue Scientifique et Technique. Office International des Epizooties*, 37 (3):1-25
- Bonnefoy C, Guillet F, Leyral G & Verne-Bourdais E (2002).** *Microbiologie et qualité dans les industries agroalimentaires*, Edition Doins, Paris, Bordeaux, 101-102p.
- Borrego AF & Romero P (1982).** Study of the microbiological pollution of a Malaga littoral area II. Relationship between fecal coliforms and fecal streptococci. VIe journée étude. Pollutions, Cannes, France, 561-569p.
- Boubakar HA (2010).** *Aquifères superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique : Cas de la communauté urbaine de Niamey (NIGER)*. Thèse de l'Université Abdou Moumouni de Niamey (Niger), 198p.
- Boulal M (1988).** *Recherches écologiques sur la faune aquatique des eaux des puits de Tiznit (Anti-Atlas occidental, Maroc)*. Thèse de 3ème cycle, Faculté des Sciences, Semlalia, Marrakech, 228p.
- Boulal M (2002).** *Recherches phréatobiologiques dans le Souss et les régions voisines du Maroc Occidental : Qualité de l'eau des puits, Biodiversité, Écologie et Biogéographie*

- historique des espèces stygobies*. Thèse de doctorat d'Etat, Faculté des Sciences, Semlalia, Université Cadi Ayyad, Marrakech, 425p.
- Boulal M, Boulanouar M, Ghamizi M & Boutin C (2017)**. Qualité de l'eau et faune aquatique des puits dans la région de Tiznit (Anti-Atlas occidental, Maroc). *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Toulouse*, 153: 25-41
- Boulal M, Touyer A & Boutin C (1997)**. Qualité de l'eau et faune aquatique des puits près d'Agadir, dans le secteur aval de la plaine du Souss. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Toulouse*, 133: 59-70.
- Boulanouar M (1986)**. *Étude écologique comparée de quelques puits de la région de Marrakech. Impact de la pollution sur la zoocénose des puits*. D.E.S. de 3ème cycle, Mémoire dactylographié, Faculté des Sciences, Semlalia, Marrakech, 159p.
- 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 de Proaselluscoxalis africanus (Crustacé Isopodes) des Jbilet*. Thèse de Doctorat d'Etat. Université de Marrakech. 210p.
- Boutin C (1984)**. Sensibilité à la pollution et répartition de quelques espèces de crustacés phréatobies à Marrakech (Maroc occidental). *Mémoire de Biospéologie*, 11(38) : 55-64.
- Boutin C (1987)**. L'eau des nappes phréatiques superficielles, une richesse naturelle vitale mais vulnérable. L'exemple des zones rurales du Maroc. *Sciences de l'Eau.*, 6(3) : 357-365.
- Boutin C (1993)**. 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*, 18p.
- Boutin C & Boulanouar M (1983)**. Méthodes de capture de la faune stygobie : Expérimentation de différents types de pièges appâtés dans les puits de Marrakech. *Bulletin de la Faculté des Sciences. Marrakech (Section Science de la Vie)*, 2:5-21.
- Boutin C & Boulanouar M (1984)**. Premières données sur la faune des puits des environs de Marrakech (Maroc occidental). *Verhand Internationale Vereinigung Limnology*, 22(1):762-765.

- Boutin C, Boulanouar M & YacoubiKhebiza M (1995).** Un test biologique simple pour apprécier la toxicité de l'eau et des sédiments d'un puits. Toxicité comparée, invitro, de quelques métaux lourds et de l'ammonium, vis-à-vis de trois genres de Crustacés de la zoocénose des puits. *Hydroécologie Appliquée*, 7(1-2): 91-109.
- Boutin C & Dias N (1987).** Impact de l'épandage des eaux usées de la ville de Marrakech sur la nappe phréatique. *Bulletin de la Faculté des Sciences. Marrakech (Section Science de la Vie)*, 3:5-27.
- Boutin C & Idbennacer B (1989).** Faune stygobie du Sud de l'Anti-Atlas marocain : premiers résultats. *Revue de Science de l'Eau*, 2:891-904.
- Botosaneanu Ed. (1986).** *Stygofauna Mundi*. Leiden (The Netherlands), E. J. Brill and Dr. W. Backhuys, 740p.
- Botta A & Bellon L (2004).** Pollution chimique de l'eau et santé humaine. Service de médecine et santé au travail. Laboratoire de biogénotoxicologie et mutagenèse environnementale (EA 1784, Institut Fédératif de Recherche- Prévention et Maintien de la Santé et Sécurité en Entreprise -112), 23p.
- Boyle TP & Fraleigh HD (2003).** Natural and Anthropogenic Factors Affecting the Structure of the Structure of the Benthic Macro-Invertebrate Community in an Effluent-Dominated Reach of the Santa Cruz River, AZ. *Ecological Indicators*, 3: 93-117.
- Brami D (2004).** L'eau : un défi géopolitique pour l'Afrique Centrale, Tchad, 47p.
- Bricha S, Ounine K, Oulkheir S, EL Haloui N & Attarassi B (2007).** Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique de la nappe phréatique M'nasra (Maroc). *Revue Afrique Science*, 03(3) : 391-404.
- Burnol A, Duro L & Grive M (2006).** Eléments traces métalliques - Guide méthodologique. Recommandations pour la modélisation des transferts des éléments traces métalliques dans les sols et les eaux souterraines, NERIS, 29p.
- Cairns JR, Lanza GR & Parker BC (1972).** Pollution related Structural and functional changes in aquatic communities with emphasis on freshwater algae and protozoa. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 124: 79-127.
- Castany G (1992).** *The Bacteriology of water*. Tosaley and Wilson edition, Washington, 740p.
- Cattoir V (2012).** Quinolones: de l'antibiogramme aux phénotypes de résistance. *Revue Francophone des Laboratoire*, 445: 79-87.
- Caumartin V (1981).** La pollution en milieu karstique, que peut-on préconiser ? *Acte. Ière Collection Naturelle de Protection des eaux souterraines de Karst* : 307-314.

- Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec, CEAEQ (2003).** *Recherche et dénombrement des coliformes totaux, méthode par filtration sur membrane.* Edition Milieu Aquatique, Québec, 660p.
- Chaguer M (2013).** *Analyse et spéciation des métaux dans un oued en zone minière cas de l'oued Essouk,* Thèse de Doctorat, Université Constantine I, 171p.
- Chapman D & Kimstach V (1996).** Selection of water quality variables. Water quality assessments: a guide to use of Biota, Sediments and water in environmental monitoring. Chapman Edition, 2<sup>nd</sup> ed. E & FN Spon, London, 595p.
- Chen CR, Malik M, Snyder M & Drlica K (1996).** DNA gyrase and topoisomerase IV on the bacterial chromosome: quinolone-induced DNA cleavage. *Journal of Molecular Biology*, 258: 627- 637.
- Chen F, Kissel DE, West LT & Adkins W (2000).** Field-scale mapping of surface organic carbon using remotely sensed imagery. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 746-753.
- Chevalier P (2003).** *Fiche synthèse sur l'eau potable et la santé humaine : Coliformes totaux,* 37p.
- Chiné A (2015):** *Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux de surface et souterraines de la plaine alluviale d'oued Nil (Wilaya de Jijel, Nord-Est Algérien).* Thèse de doctorat, Université Mohammed-Seddik Ben Yahia - Jijel Faculté des sciences de la nature et de la vie, 168p
- Chippaux JP, Houssier S, Gross P, Bouvier C & Brissaud F (2002).** Etude de la pollution de l'eau souterraine de la ville de Niamey, Niger. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique*, 95(2): 119-223.
- Coineau N, Henry Jp, Magniez G & Negoescu I (1994).** Isopoda Aquatica. In: *Encyclopedia Biospeologica*, C. Juberthie and V. Decu edition, Tome 1. *Société de Biospéologie*, Moulis, Bucarest, 123-140p.
- Colas F, Vigneron A, Felten V & Devin S (2014).** The contribution of a niche-based approach to ecological risk assessment: Using macroinvertebrate species under multiple stressors. *Environmental Pollution*, 185: 24-34.
- Colloque international (1986).** Session de perfectionnement de distribution de produits alimentaires à Abidjan 2-15 fev 1986. Limoge : Fondation de l'eau, 58-61p.
- Commission du Bassin du Lac-Tchad, CBLT (1994).** Inventaire des potentialités naturelles du bassin du Lac Tchad, volet hydrogéologique, rapport de synthèse, 194p.

- Coulibaly K (2005).** *Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau des puits de certains quartiers du district de Bamako.* Thèse présentée pour obtenir le grade de docteur en pharmacie, Faculté de Médecine de Pharmacie et d'Odonto-stomatologie Université de Bamako, 52p.
- Coulibaly L, Diomandé D, Coulibaly A & Gourène G (2004).** Utilisation des ressources en eaux, assainissement et risques sanitaires dans les quartiers précaires de la commune de Port-Bouët (Abidjan ; Côte d'Ivoire). *Vertigo-la revue électronique en sciences de l'environnement*, (5):3
- Culver DC & White WB (2004).** Encyclopedia of caves. *Elsevier*, Academic Press, 696p.
- Cvetkov L (1968).** Un filet phréatobiologique. *Bulletin de l'Institut de Zoologie et Musée, Sofia*, 215-219p.
- Daccache A, Elbana MA & Fouial A (2016).** Gestion des ressources en eau. Centre international de hautes études agronomiques méditerranéennes éd. *Mediterra 2016: Zéro gaspillage en Méditerranée. Ressources naturelles, alimentation et connaissances.* Paris, Presses de Sciences Po, 3: 71-94.
- Dacosta Y (1995).** Effet comparé des différents modes de conditionnement sur la croissance des bactéries pathogènes responsables des intoxications alimentaires. Paris, 142p.
- Daffri A (2008).** *Biodégradation des crésols par le microbiote des eaux usées de la ville de Constantine.* Mémoire de Magister, Université de Mentouri Constantine, 202p.
- Dalmas A (1972).** *Contribution à l'étude des caractères physico-chimiques et de la faune de quelques puits artificiels de la Provence.* Thèse de Doctorat 3ème cycle, Université de Provence : 159p.
- Dalmas A (1973).** Zoocénoses des puits artificiels en Provence. *Annales de Spéologie*, 28 (3): 517-522.
- Danielopol DL, Griebler C, Gunatilaka A & Notenboom J (2003).** Present state and future prospects for groundwater ecosystems. *Environmental Conservation*, 30:104-130.
- Danielopol DL, Pospisil P & Rouch R (2000).** Biodiversity in groundwater: a large-scale view. *Trends in Ecology and Evolution*, 15 (6) : 223-224.
- Dansou BS & Odoulami L (2015).** Facteurs de dégradation des eaux de puits à usage domestique dans la commune de Pobè au Sud-Est du Bénin, *Afrique SCIENCE*, 11(6) : 367-376
- Datry T, Malard F & Gibert J (2005).** Response of invertebrate assemblages to increased groundwater recharge rates in a phreatic aquifer. *Journal of the North American Benthological Society*, 24: 461-477.

- Dedjiho CA, Mama D, Dimon BF, Chouti W, Alassane A, Fiogbe ED & Sohounhloue CKD (2013).** Influence de l'état d'eutrophisation de la lagune de Gbèzoumè (Ouidah) sur sa faune aquatique. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 7: 2069-2077.
- Degbey C, Makoutodé M, Agueh V, Dramaix M & De Brouwer C (2011).** Santé - Facteurs associés à la qualité de l'eau de puits et prévalence des maladies hydriques dans la commune d'Abomey-Calavi (Bénin). *Cahiers d'études et de recherches francophones/santé* 21 (1), 47-55.
- Dégbey C, Makoutodé M, Ouendo EM, De Brouwer C (2010).** Pollution physicochimique et microbiologique de l'eau des puits dans la Commune d'Abomey-Calavi au Bénin en 2009. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4(6): 2257-2271.
- Deharveng L, Stoch F, Gibert J, Bedos A, Galassi D, Zagnajster 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.
- De la Fuente R, Suarez G & Schleifer KH (1985).** *Staphylococcus aureus* subsp. *Anaerobius* subsp. Nov, the causal agent of abscess disease of sheep. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 216-230.
- Delloye F & Rentier C (2005):** Système d'évaluation de la qualité des eaux souterraines en Région wallonne. *Tribune de l'eau*, 6(631): 3-10.
- Direction de l'Eau Potable & des Eaux Souterraines, Québec, DEPES (2019).** Guide d'interprétation du Règlement sur la qualité de l'eau potable, 124p. Mise à jour juin 2019
- Dieng NM, Orban P, Otten J, Stumpp C, Faye S & Dassargues A (2017).** «Temporal Changes in Groundwater Quality of the Saloum Coastal Aquifer». *Journal of Hydrology : Regional Studies* 9: 163-82.
- Dionkas J (2015).** *Étude hydrobiologique de la qualité des eaux de quelques puits et forages de la ville de N'Djaména*. Mémoire de Master, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I. 51p.
- Direction des Ressources en Eau et de la Météorologie, DREM (2012).** Données des paramètres climatiques. Division climatique-Tchad.
- Djaouda M, Gake B, Zébazé Togouet SH, Wadoube Z, Nola M & Njiné T (2018).** Évaluation de la contamination par *Salmonella sp.* et *Vibrio cholerae* des eaux de puits de Garoua, Nord Cameroun. *Afrique SCIENCE* 14(4): 209-224

- Djuikom E, Temgoua E, Jugnia L, Nola M & Baane M (2009).** Pollution bactériologique des puits d'eau utilisés par les populations dans la Communauté Urbaine de Douala Cameroun. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 3(5): 967-978.
- Dole-Olivier MJ, Castellarini f, Coineau N, Galassi DMP, Martin P, Mori N & Valdecasas AJG (2009).** Towards an optimal sampling strategy to assess groundwater biodiversity: comparison across six european regions. *Freshwater biology*, 54: 777-796.
- Dole-Olivier MJ, Malard F, Martin D, Lefebure T & Gibert J (2009).** Relationships between environmental variables and groundwater biodiversity at the regional scale. *Freshwater Biology. Special Issue: Assessing and conserving Groundwater Biodiversity*, 54 (4): 797-813.
- Dovonou FE (2012).** *Diagnostic qualitatif et environnemental de l'aquifère superficiel du champ de captage intensif de Godomey au Bénin (Afrique de l'Ouest) : éléments pour un plan d'actions stratégiques de protection des ressources en eau souterraines exploitées.* Doctorat ès Science en Hydrologie et Gestion Intégrée des Ressources en Eau. Université d'Abomey, Bénin, 143p.
- Dovonou FE, Alassane A, Adjahossou VN, Agbodo B, Djibril R & Mama D (2017).** Impacts de l'assainissement autonome sur la qualité des eaux de puits dans la Commune de Sèmè-Podji (Sud-Bénin), *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 11(6): 3086-3099
- Duchanfour (1997).** *Le traitement des eaux.* Ecole polytechnique, Montréal, Canada, 720 p.
- Dumas P, Boutin C & Gibert J (2001).** Groundwater macrocrustaceans as natural indicators of the Ariège alluvial aquifer. *International Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, 86: 619-633
- Dupont A (1981).** *Hydraulique Urbaine : Hydrologie, captage et traitement des eaux.* Eyrolles édition, Paris, 1300p.
- Durand J & Levêque C (1980).** *Flore et Faune aquatique de l'Afrique Sahélo-Soudanienne Tome 1.* ORSTOM, Document Technique 44, Paris, France, 389p.
- Edberg SC, Rice EW, Karlin RJ & Allen JM (2000).** *Escherichia coli*: the best biograd drinking water indicator for public health protection. *Journal of Applied Microbiology*, 88, 106-116.
- El Adnani M, Aït Boughrous A, Nejmeddine A, Yacoubi-Khebiza M & El Gharmali A (2007).** Impact des rejets miniers sur la physico-chimie de l'eau et sur la structure des zoocénoses des puits environnants de la région de Marrakech, Maroc. *Environmental Technology*, 28 (1): 71-82.

- El Alami El Filali A (2010).** *Biodiversité aquatique souterraine du Maroc : base de données, répartitions et implications en termes de conservation.* Thèse doct. Faculté des Sciences, Semlalia, Université de Cadi Ayyad, Marrakech, 123p.
- EL Haissoufi H, Berrad S, Merzouki M, Aabouch M, Bennani L, Benlemlih M, Idir M, Zanibou A, Bennis Y & EL Ouali Lalami A (2011).** Pollution des eaux de puits de certains quartiers de la ville de Fes, Maroc, *Revue de Microbiologie Industrielle. Sanitaire et Environnementale*, 5(1) : 37-68
- El Moustaine R, Chahlaoui A & Rour A (2013).** Groundwater fauna can be used as indicators of anthropogenic impacts on aquifers: A case study from Meknes area, Morocco. *International Journal of Biosciences*, 3 (10): 139-159.
- El Ouedghiri K, El Oualti A, El Ouchy M, Zerrouq F, Ouazzani Chahdi F & El Ouali Lalami A (2014).** Risques sanitaires liés aux composés chimiques contenus dans l'eau de boisson dans la ville de Fès : Cas des ions nitrates et nitrites). *Journal of Materials and Environmental Science*, 5 (S1): 2284-2292.
- Elmund GK, Allen JM & Rice EW (1999).** Comparaison of *Escherichia coli*, total coliform and fecal coliform populations as indicators of wastewater treatment efficiency». *Water Environment Research*, 71: 332-339.
- Emetere ME & Oladimeji TE (2019).** Air quality investigation over Moundou Chad. *Institute of Physics, Conference Series: Earth and Environment Sciences*, 331(01): 8-12.
- Epe B & Woolley P (1984).** The binding of 6-demethylchlortetracycline to 70S, 50S and 30S ribosomal particles: A quantitative study by fluorescence anisotropy. *EMBO Journal*, 3(1): 121-126.
- Er-Raioui H, Bouzid S, Khannous S & Zouag MA (2011).** Contamination des eaux souterraines par le lixiviat des décharges publiques : Cas de la nappe phréatique R'Mel (Province de Larache - Maroc Nord-Occidental). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 5(3) : 1118-1134.
- Essouli OF, Miyouna T, Essouli Kessimpou P, Boudzoumou F, Matini L & Faye S (2020).** Hydrochimie des eaux de surface et souterraines de la partie Nord de Brazzaville: origine et processus de minéralisation. *Revue RAMReS-Sciences Appliquées et de l'Ingénierie*, 2(1) : 1-15
- Ezziane S (2007) :** *Traitement des eaux de rejets, Mémoire Présenté pour l'obtention de Diplôme de Magister*, Université HASSIBA BEN BOUALI de CHLEF, 186p.

- Fakher A, Oulbaz Z, Yacoubi-Khebiza M, Coineau N & Boutin C (1998).** Étude expérimentale de la sensibilité comparée de trois Crustacés stygbies vis-à-vis de diverses substances toxiques pouvant se rencontrer dans les eaux souterraines. *Mémoire de Biospéologie*, XXV (52):167-181.
- Fakher El Abiari A (1999).** *Rôle des facteurs abiotiques dans la répartition de la faune aquatique souterraine : Cas des Crustacés Péracarides stygbies.* Thèse Doctorat National, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, 208p.
- Fanou AL, Mobio TA, Creppy EE, Fayomi B, Fustoni S, Møller P, Kyrtopoulos S, Georgiades P, Loft S, Sanni A, Skov H, Øvrebø S & Atrup H (2006).** Survey of air pollution in Cotonou, Benin-air monitoring and biomarkers. *Science of Environment*, 358(1-3): 85-96.
- 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
- Festy B, Hartemann P, Ledrans M, Levallois P, Payment P & Tricard D (2003).** Qualité de l'eau. Environnement et santé publique-Fondement et pratiques, 333-368.
- Fomengni Njakou J.C (2010).** Qualité physico-chimique et bactériologique de la nappe phréatique et des effluents dans le bassin versant de Besseke à Bonabéri (zone industrielle de Douala). Cameroun, 55-70p.
- Food Alimentary Oganization, FAO (2011):** A Food chain crisis management framework. In Preventing *Escherichia coli* in food Rome, 16p.
- Foppen J & Schijven F (2006).** Evaluation of data from the literature on the transport and survival of *Escherichia coli* and thermotolerant coliforms in aquifers under saturated conditions. *Water Research*, 40: 401-426.
- Frontier S, Davault D, Gentilhomme V & Lagadeuc Y (2001).** *Statistique pour la science de la vie et de l'environnement*, Cours et exercice corrigé, éd. Dunod, Paris, 377p.
- Gale E, Cundliffe E, Reynolds PE, Richmond MH & Waring MJ (1981).** The molecular basis of antibiotic action. New York, USA, 670p.
- Garcia-Armisen T (2006).** *Etude de la dynamique des Escherichia coli dans les rivières du bassin de la Seine.* Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles, 81p.
- Gaujous D (1993).** La pollution dans les milieux aquatiques. Aide-mémoire. Editions Technique et Documentation, 212p.
- Gauthier F (2002).** *Biofilms et qualité biologique de l'eau potable au cours de distribution.* Mémoire de DESS. Qualité et Gestion de l'Eau, 78p.

- Gautier C & Fellous JL (2008).** Eau, pétrole, climat : Un monde en panne sèche, Edition ODILE JACOB, 171-172p.
- Gbamélé KS, Konan KS, Kouassi KL, Brou LA, Konan KF & Bini KD (2020).** Evaluation de la Contamination Chimique des Eaux Souterraines par les Activités Anthropiques : Cas de la Zone d'Ity-Floleu Sous-Préfecture de Zouan Hounien, Ouest de la Côte d'Ivoire. *European Scientific Journal*, 16(6):1857-7881
- Gendron A, Burelle S, Roy G (2007).** État de situation des rejets anthropiques de mercure dans l'environnement au Québec, Direction des politiques en milieu terrestre, p35.
- Gevaert NV (2003).** *International Union of pure and applied chemistry*. Moscow, magister Press, 21p.
- Gibert J (1986).** Écologie d'un système karstique jurassien : Hydrogéologie, Dérive animale, Transits de matières, Dynamique de la population de Niphargus (Crustacé Amphipode). *Mémoire de Biospéologie*, 13(40) : 375p.
- Gibert J, Danielopol DL & Stanford J (1994).** Groundwater Ecology. *Academic Press, New York.*, 571p.
- Gibert J & DEHARVENG L (2002).** Subterranean ecosystems: a truncated functional biodiversity. *Bioscience*. 52: 473-481.
- Ginet R & Decou V (1977).** *Initiation à la biologie et à l'écologie souterraine*. Édition Jean Pierre Delarge, Paris France. 345p.
- Ginet R & Mathieu J (1968).** Comparaison des températures létales supérieures de Niphargus longicaudatus (Crust. Amphipodes) hypogés et épigés. *Annales de biospéléologie*, 23p.
- Genin B, Chauvin C & Ménard F (2003).** Cours d'eau et indices biologiques : Pollutions, méthodes IBGN, 2ème Edition Educagri, 18-19p.
- Givord L & Dorioz JM (2010).** La survie des microorganismes d'origine fécale dans les effluents et les sols. INRA thonon Umr carrtel. Etude réalisée dans le cadre du projet CasDAR Territ'Eau, 23p.
- Gold C (2002).** *Etude des effets de la pollution métallique (Cd/Zn) sur la structure des communautés de diatomées périphytiques des cours d'eau. Approches expérimentales in situ et en laboratoire*. Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I, 175p.
- Graun GF, Berger PS & Calderon RL (1997).** Coliform bacteria and waterborn disease out breaks. *Journal of American Water work Associative*. 89(3): 96-104
- Gray JS (1989).** Effects of the Environmental Stress on Species Rich Assemblages. *Biological Journal of the Linnean Society*, 37: 19-39.

- Griebler C & Avramov M (2015).** Groundwater ecosystem services: a review. *Freshwater Science*, 34: 355-367.
- Grosclaude G (1999).** L'eau, usage et polluants, Edition INRA, tome II, Paris, 118p.
- Guergazi S & Achour S (2005).** Caractéristiques physico-chimiques des eaux d'alimentation de la ville de Biskra. Pratique de la chloration. *Courrier du Savoir*, 6: 53.
- Hahn HJ (2002).** Distribution of the aquatic meiofauna of the Marbling Brook catchment (Western Australia) with reference to land use and hydrogeological features. *Archiv für Hydrobiologie*, Supplement, 139: 237-263.
- Hahn HJ & Fuchs A (2009).** Distribution patterns of groundwater communities across aquifer types in south-western Germany. *Freshwater Biology*, 54: 848-860.
- Hartemann P (2013).** Eau de consommation, Risque, Santé. *Sciences Eaux & Territoires*, 10: 14-21.
- Henry JP & Magniez G (1983).** Introduction pratique à la systématique des organismes des eaux continentales françaises. 4: Crustacés isopodes (principalement Asellotes). *Bulletin de la Société Linnéenne de Lyon*, 52(10): 319-357.
- Hertig JA (2006).** Etude d'impact environnemental, Volume 23, 2ème Edition Revue et adaptée, 296p.
- Hervant F, Mathieu J, Barré H, Simon K & Pinon C (1997).** Comparative study on the behavioral, ventilatory and respiratory responses of hypogean and epigean crustacean to long-term starvation and subsequent feeding. *Comparative Physiology and Biochemistry*. A 118: 1277-1283.
- 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.
- Holt JG, Kreing NR, Sneath PHA, Staley JT & Willians ST (2000).** Manual of determinative bacteriology. 9th edition Philadelphia. Lippincott Willian and Wilkins, 78p.
- Hong W, Zeng J & Xie J (2014).** Antibiotic drugs targeting bacterial RNAs. *Acta Pharmaceutica Sinica B*, 4: 258-265.
- Host S & Telle-Lamberton M (2014).** Le milieu urbain, réceptacle de nuisances multiples, Territoires, incubateurs de santé ? *Les Cahiers de l'IAU îdF*, 170 (17): 36-39.
- Houemenou HR (2020) :** *Qualité des eaux souterraines et de surface dans la métropole de Cotonou au Sud du Bénin. Implications pour la leptospirose.* Thèse de doctorat, Université d'Avignon, 146p.

- Hounsinou P, Mama D, Dovonou F & Alasane A (2015).** Seasonal evolution of the quality microbiological of the natural waters in the township of Abomey-Calavi (South Benin). *British Journal of Earth Sciences Research*, 3(1): 30-41.
- Hounsounou EO, Agassounon Djikpo Tchibozo M, Kelome NC, Vissin E W, Mensah G A & Agbossou E (2016).** Pollution des eaux à usages domestiques dans les milieux urbains défavorisés des pays en développement : Synthèse bibliographique. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 10(5): 2392-2412.
- Hunt GW & Stanley EH (2003).** Environment factors influencing the composition and distribution of the hyporheic fauna on Oklahoma streams: variation across ecoregions. *Archiv für Hydrobiologie*, 158: 1-23.
- Hüppop K (1986).** The role of metabolism in the evolution of cave animals. *National speleology society bulletin*. 47: 137-146.
- 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)*. Doctorat d'Etat 3ème cycle, Fac. Sc. Semlalia, Marrakech, 275p.
- Initiative-Développement (2019).** Consolidation du service public de l'eau dans le sud du Tchad & amélioration de l'assainissement urbain de Moundou par la sensibilisation et l'accès aux latrines, 33p.
- Institut National des Statistiques, des Études Économiques Démographiques, INSEED (2009).** *Deuxième Recensement Général de la population et de l'Habitat Tchad*. 87p.
- Institut National des Statistiques, des Études Économiques Démographiques, INSEED (2012).** *Principaux indicateurs globaux issus de l'analyse thématique du deuxième recensement de la population et de l'habitant*, N'Djaména, 42p.
- Institut National de Santé Publique Québec, INSPQ (2003).** Centre d'expertise et de référence en santé publique. Rapport annuel de gestion, 60p.
- Institut Pasteur Production, IPP (1978).** Milieux et réactifs de laboratoire Pasteur. Paris, EditionsPublifab, 573p.
- Jestin E (2000).** *La production et le traitement des eaux destinées à l'alimentation et à la préparation de denrées alimentaires*. Agence de l'Eau Seine-Normande, France. 34p.
- Josephine HR, Kumar I & Pratt RF (2004).** The Perfect Pencillin? Inhibition of a bacterial DDpeptidase by peptidoglycan-mimetic betalactams. *Journal of the American Chemical Society*, 126:81222-81223
- Jourdan B, Piantone P, Lerouge C & Guyonnet D (2005).** Atténuation des métaux à l'aval de sites de stockage de déchets (Synthèse bibliographique). BRGM/RP 54417, 110p.

- Juberthie C & Decu V (1994).** Encyclopaedia Biospeologica. Tome 1. *Société de biospéologie*. Moulis (France)-Bucarest (Roumanie), 834p.
- Kadjangaba E (2007).** *Etude hydrochimique et isotopique du système zone non saturée-Nappe dans la zone non urbaine de N'Djamena : impact de la pollution*. Thèse de doctorat Ph.D. Université d'Avignon. 286p.
- Kadjangaba E, Daïra D, Doumnang Mbaigane JC, Ndoutamia Guelmbaye A & Yaya Mahmout (2018).** « Impact des Processus Hydrochimique sur la Qualité des Eaux souterraines de la Ville de N'Djaména-Tchad ». *European Scientific Journal*, 14(18): 162p.
- Kahne D, Leimkuhler C, Lu W & Walsh C (2005).** Glycopeptide and lipoglycopeptide antibiotics. *Chemical Reviews*. 105: 425-448.
- Kaspar W, N'Diekhor Y, Gueladio C & MARCEL T (1999).** Environnement urbain. Autogestion d'espace urbain défavorisé à N'Djamena, Tchad, Berlin 263p.
- Katz L & Ashley GW (2005).** Translation and protein synthesis : macrolides. *Chemical Reviews*. 105: 499-528.
- Khaldoun L, Merzoug D & Boutin C (2013).** Faune aquatique et qualité de l'eau des puits et sources de la région de Khenchela (Aurès, Algérie nord-orientale). *Bulletin de la Société Zoologique de France*, 138(1-4): 273-292.
- Kenfaoui A (2008).** Economisons l'eau en la préservant de la pollution. *Revue d'histoires des techniques*, 140: 94-96.
- Kerans BL, Karr JR & Ahlstedt SA (1992).** Aquatic Invertebrate Assemblages: Spatial and Temporal Differences among Sampling Protocols. *Journal of the North American Benthological Society*, 11: 390.
- Khan AA, Tobin A, Paterson R, Khan H & Wareen R (2005).** "Application of CCME Procedures for Deriving Site-Specific Water Quality Guidelines for the CCME Water Quality Index". *Water Quality Research Journal of Canada*, 40(4): 448-456,
- Kholtei S, Bouzidi A, Bonini M, Fekhaoui M, Sbai K, Anane R & Creppy EE (2003).** Contaminations des eaux souterraines, *Vecteur Environnement*, 36(5): 80p.
- Kinyamu JK, Kanja LW, Skaare JU & Maitho TE (1998).** Levels of organochlorine pesticides residues in milk of urban mothers in Kenya. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 60: 732-738.
- Krogerus R (1932).** Uber die okologie und verbreitung der arthropoden des triebsan gebiete an den kunsten Finlands. *Acta. Zoologica. Fennica*, 12(12): 130p.

- Kumar A & Dua A (2009).** “Water Quality Index for assessment of water quality of river Ravi at Madhopur (India)”, *Global Journal of Environmental Science*, 8(1): 49-57
- Lagnika M (2015).** *Diversité faunistique et qualité de l'eau des puits dans les communes de Lokossa, Parakou et Pobé au Bénin.* Thèse de Doctorat, Fac. Sciences et Techniques, Univ. Abomey-Calavi, Bénin, 211p.
- Lagnika M, Ibikounlé M, Mazou F, Sakiti N & Boutin C (2014a).** Diversité faunistique et qualité physico-chimique de l'eau des puits à Parakou (Bénin, Afrique de l'Ouest). *Bulletin de la société d'Histoire Naturelle de Toulouse*, 150: 1-14
- Lagnika M, Ibikounle M, Montcho J-PC, Wotto VD & Sakiti NG (2014b).** Caractéristiques physico-chimiques de l'eau de puits dans la commune de Pobè, Bénin. *Journal of Applied Biosciences*, 79: 6887-6897.
- Lakhdari FT (2014).** *Contribution à la connaissance de la stygofaune d'Algérie : Etude de la qualité de l'eau et la faune aquatique des puits de la Région de Mascara (Nord Ouest Algérien).* Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen. Mémoire de Master, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers, 62p
- Lalanne F (2012).** Etude de la qualité de l'eau le long de la chaîne approvisionnement au niveau des consommateurs dans 10 villages de la Province du Ganzourgou, (Région du Plateau Central, Burkina Faso), 71p.
- Laurent F (2013).** Agriculture et pollution de l'eau : modélisation des processus et analyse des dynamiques territoriales. Sciences de l'environnement, Université du Maine, 188p.
- Lebart L, Maurineau A & Piron M (1982).** Analyse statistique des réponses libres dans les enquêtes socio-économiques. *Consommation-Revue de Socio-Economie*, (1) : 39-62
- Leclercq L & Maquet B (1987).** Deux nouveaux indices diatomiques et de qualité chimique des eaux courantes. Comparaison avec différents indices existants, *Cahiers de Biologie Marine*, 28: 303-310
- Legendre L & Legendre P (1984).** *Écologie numérique*, deuxième édition revue et augmentée. Tome 2 : La structure des données écologiques. Masson, Paris et les Presses de l'Université du Québec. Viii+, 335p.
- Lemoufouet J, Tendonkeng F, Mekuiko Watsop H, Djimsanodji A, Emile Miegoue & Mube Kuitche H (2020).** Caractéristique physico-chimique de l'eau d'abreuvement des ruminants dans la zone sahélienne du Tchad : cas de Batha Ouest, *Afrique SCIENCE*, 16(5) 44-54
- Le Tchad Aujourd'hui (2010).** Les éditions du Jaguar, 1<sup>ère</sup> édition, 205p.

- Levallois P & Lévêque B (2003).** *Bactéries hétérotrophes aérobies et anaérobies facultatives*. Fiches synthèses sur l'eau potable et la santé humaine, Institut National de la Santé Publique au Québec, 3p.
- Levallois P & Phaneuf D (1994).** La contamination de l'eau potable par les nitrates : analyse des risques à la santé. *Revue Canadienne de Santé Publique*, 85(3): 192-196
- Lévêque C & Balian EV (2005).** Conservation of freshwater Biodiversity: does the real world meet scientific dream? *Hydrobiologia*, 542: 25-26
- Leyral G, Ronnefoy C & Guillet F (2002):** Microbiologie et qualité des industries agroalimentaire, Paris, 245p.
- Lincoln JR (1972).** *Metastenasellus wikkiensis* sp.n. from warm-water spring in North-Eastern Nigeria (Asellota: Asellidae: Stenallinae). *Bulletin of the British Museum Natural History (Zoology)*, 24 (3): 213-221.
- Louze L & Bendaira Z (2018) :** *Diversité Benthique et Qualité des Eaux Souterraine de la Région D'ain M'lila (Oum El Bouaghi, Haute Plaine de l'Est Algérien)*. Mémoire de Master. Université de Larbi Bn M'hidi Oum El Bouaghi, Faculté Des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie, 81p.
- Lyakhloufi S (2001).** Vulnérabilité et risque de pollution de la nappe phréatique du Haouz de Marrakech. Thèse Doctorat National, Fac. Sc. Université Cadi Ayyad, Marrakech, 180p.
- Lyakhloufi S, Ouazzani N, Er-Rouane S, Hassani L & El Hebil A (1999).** Impact de l'utilisation des eaux usées urbaines brutes sur la qualité de l'eau d'une nappe alluviale près de Marrakech (Maroc). *Bulletin de la société d'Histoire Naturelle de Toulouse*, 135: 59-70.
- Magniez G (1979).** *Metastenasellus powelli* sp. n., a new stenasellid isopod crustacean from littoral groundwaters of southeastern Nigeria. *Crustaceana* 37(3): 265-276.
- Magniez G (1986).** Répartition transsaharienne de *Metastenasellus* Magniez ; Description d'une nouvelle espèce d'Algérie (Isopoda Asellota). *Stygologia*, 2 (2):267-275.
- Makoutode M, Assani AK, Ouendo EM, Agueh VD & Diallo P (1999).** Qualité et mode de gestion de l'eau de puits en milieu rural au Bénin : cas de la sous-préfecture de Grand-Popo, *Médecine d'Afrique Noire*, 46 (11): 529-534
- Malard F, Dole-Olivier MJ, Mathieu J & Stoch F (2002).** Sampling manual for the assessment of regional groundwater biodiversity-Documents from PASCALIS, an European project: Protocols for the assessment and conservation of aquatic life in the subsurface, 74p.

- Malard F, Galassi D, Lafont M, Doledec S & Ward JV (2003).** Longitudinal patterns of invertebrates in the hyporheic zone of a glacial river. *Freshwater Biology*, 48: 1709-1727.
- Malard F, Henry JP & Douady CJ (2014).** The scientific contribution of Guy Magniez (1935–2014). *Subterranean Biology* 13: 55-64.
- Malard F, Plénet S & Gibert J (1996).** The use of invertebrates in groundwater monitoring: a rising research field. *Ground Water Monitoring and Remediation* 16:103-116.
- Malard F, Reygrobellet JL, Gibert J, Chappuis R, Drogue C, Winniarsky T & Bouvet Y (1999).** Sensitivity of underground karst ecosystems to human perturbation - conceptual and methodological framework applied to the experimental site of Terriou (Hérault-France). *Verhandlungen Internationale Vereinigung Limnologie*, 25: 1 414-1 419.
- Malik N & Slim Shimi N (2019).** Etude de la vulnérabilité des eaux souterraines de la ville de Gafsa (Sud- Ouest de la Tunisie) : Effets anthropiques et conséquences, *Algerian Journal of Environment Science and Technology*, 5(4): 1127-1134
- Maoudombaye T, Ndoutamia G & Ngakou A (2016).** Evaluation de la qualité bactériologique des eaux de puits, de forages et de rivières consommées dans le bassin pétrolier de Doba au Tchad. *International Journal of Recent Scientific Research*, 7(6): 12236-12243.
- Marmonier P & Dole MJ (1986).** Les Amphipodes d'un bras court-circuité du Rhône. Logique de répartition et réactions aux crues. *Revue des Sciences de l'Eau*, 5: 461-486
- Marmonier P, Vervier P, GIBERT J & Dole-Olivier MJ (1993).** Biodiversity in ground waters. *Trends in Ecology & Evolution*, 8(11): 392-395
- Massang T, Noumi GB, Tchadanaye NM & Dikdim Dangwang JM 2015.** Heavy Metals Pollution Level in Water, Fish and Sediments from the Logone River Within Moundou City (Chad). *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, 3(5): 275-281
- Mathieu J & Turquin MJ (1992).** Biological processes at the population level. II. Aquatic populations: Niphargus (stygobiont Amphipod) case. *In The Natural History of Biospeology*. A.I. Camacho (Ed), Museo Nacional de Ciencias Naturales (Madrid), 263-293.
- MATUH (Ministère de l'Administration Territoriale, de l'Urbanisme et de l'Habitat) (2008):** Nouveau découpage administratif du Tchad, 3<sup>e</sup> édition, analyse et conception scientifique de N'Djamena, 19p.

- Mauclaire L & Gibert J (2001).** Environment determinants of bacterial activity and faunal assemblage in alluvial river bank aquifers. *Archives für Hydrobiologie*, 152: 469-487.
- Mba FF, Temgoua E, Kengne PD & Kamhoua SN (2019) :** Vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution dans la ville de Dschang, Ouest-Cameroun. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 13(5): 39-56
- Mbawala AA & Ngassoum MB (2010).** Evaluation de la pollution physicochimique et microbienne des eaux de puits de Dang-Ngaoundéré (Cameroun). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4(6): 1962-1975.
- Meot B & Alamy Z (1990).** Les eaux usées urbaines : Règlementation des rejets urbaines, traitements de finition par géoépuration, BRGM, 3p.
- Merritt RW, Cummins KW & Berg MB (2008).** An Introduction to the Aquatic Insects of North America. 4<sup>th</sup> edition, Kendall Hunt Publishing, Dubuque, Iowa, U.S.A., 1159p.
- Merzoug D, Khiari A, Aït Boughrous A & Boutin C (2010).** Faune aquatique et qualité de l'eau des puits et sources de la région d'Oum El Bouaghi (Nord-est Algérien). *Hydroécologie Appliquée*, 17: 77-97.
- Merzoug D, Khiari A, Aït Boughrous A & Boutin C (2011).** Faune aquatique et qualité de l'eau des puits et sources de la région d'Oum-El-Bouaghi (Nord-Est Algérien). *Hydroécologie Appliquée*, 17: 77-97
- Météo-climat Moundou (2019-2020).** Valeurs climatiques moyennes annuelles. *tutiempo.net*
- Mfonka Z, Ndam Ngoupayou JR, Ndjigui PD, Zammouri M, Kpoumie A & Rasolomanana E (2015).** Hydrochimie et potabilité des eaux du bassin versant du Nchi dans le plateau Bamoun (Ouest Cameroun). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9(4): 2200-2218.
- Miquel G (2003).** *La qualité de l'eau et de l'assainissement*, Rapport d'information du Sénat, Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Techniques (OPECST), tome I, 195p.
- Mission Scientifique Technique & Pédagogique, MSTP (2007).** L'Eau enjeux et perspectives de recherche, 110p.
- Molinie L (2009).** Dispositifs rustiques d'alimentation et de traitement de l'eau potable pour des services de petites tailles en régions défavorisées. Synthèse Technique. *Agro Paris Tech-Engref*, 28p.
- Monjerezi M & Ngongondo C (2012).** Water Quality, *Exposure and Health*, (4): 39-53
- Moussa D, Njiné T, Nola M, Zébazé Togouet S.H, Nougang ME & Djah M (2010).** Changes in bacterial abundances of underground water in response to long time of

- storage at home in Yaoundé (Cameroon), *European Journal of Water Quality*, 41:131-143.
- Moussa D, Nola M, Gake B, Ebang Menye D & Njiné T (2011).** Faecal Contamination of Well Water in Garoua (Cameroon): Importance of Household Storage and Sanitary Hygiene, *International Journal of Research in Chemistry Environment*, 1: 97-103
- Moussa RS, Alma MMM, Laouali MS, Natatou I & Habou I. (2018).** Caractérisation physico-chimique des eaux des aquifères du Continental Intercalaire/Hamadien et du Continentalsiems Terminal de la région de Zinder (Niger). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 12(5): 2395-2411.
- Moustaine R, Abdelkader C & Rour H (2013).** Groundwater fauna can be used as indicators of anthropogenic impacts on aquifers: A case study from Meknes area, Morocco. *International Journal of Bioscience*. 3(10): 139-152
- Mpakam HG, Kamgang Kabeyene BV, Kouam Kenmogne GR, Bemmo N & Ekodeck GE (2006).** L'accès à l'eau potable et à l'assainissement dans les villes des pays en développement (cas de Bafoussam au Cameroun). *Vertigo-Revue en Sciences de l'Environnement*, 7(2).1-27
- Mpakam HG, Kouam Kenmogne GR, Tamo Tatiése T, Maire E, Boeglin JL, Ekodeck GE & Dupre B (2009).** Etude des facteurs de pollution des ressources en eau en milieu urbain : cas de Bafoussam (Ouest Cameroun). Actes du colloque international sur le thème «changements climatiques et évaluation environnementale», Niamey (Niger), 27p.
- Mulliss RM, Revitt DM & Shutes RB (1997).** The impacts of discharges from two combined sewer overflows on the water quality of an urban watercourse. *Water Science Technology*, 36: 195-199.
- Nana Nkemegni G (2017).** *Biodiversité de la Stygofaune dans les Hauts Plateaux Bamoun (Ouest- Cameroun)*. Thèse de Doctorat/Ph.D, Faculté des Sciences. Université de Yaoundé I, 176p.
- Nana Nkemegni G, Zébazé Togouet SH, 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(4): 393-401
- Nang-yana N (2013).** *Etude comparative de la qualité des eaux de forages dans la ville de N'Djaména (Tchad) : Cas du 8<sup>e</sup> arrondissement*. Mémoire d'Ingénieur de Conception, Institut du Sahel, Université de Maroua, 80p.

- N'diaye A (2008).** *Etude bactériologique des eaux de boissons vendues en sachet dans quatre communes d'Abidjan.* Thèse de Doctorat en Pharmacie (Diplôme d'Etat), Université de Bamako, Faculté de Médecine, de Pharmacie et d'Odonto-Stomatologie, 166p.
- N'diaye P, Badu IO, Dieng M, Fall C & Diadu AT (2010).** Qualité de l'eau de consommation des ménages : analyse et plan d'action en zone rurale sénégalaise. *Santé Publique*, 22(2): 193-200
- Nedeau EJ, Merritt RW & Kaufman MG (2003).** The Effect of an Industrial Effluent on an Urban Stream Benthic Community: Water Quality vs. Habitat Quality. *Environmental Pollution*, 123: 1-13.
- Ngaram N, Maoudombaye T & Tarkodjiel M (2021).** Evaluation of Heavy Metals in Drinking Water Resources in the Department of Nyan, Province of Logone Oriental in Chad. *American Journal of Applied Chemistry*, 9(1): 13-20.
- Njitchoua R, Dever L, Fontes JC & Naah E (1997).** Geochemistry , origin and recharge mechanisms of groundwater from the Garoua Sandstone aquifer, noethen Cameroon. *Journal of Hydrology, Elsvier*, 190; 123-140.
- Nola M, Njiné T & Boutin C (1998).** Variabilité de la qualité des eaux souterraines dans quelques stations de Yaoundé (Cameroun). *Mémoires de Biospéologie*, 25: 183-191.
- Nola M, Njiné T, Djuikom E & Sikati F (2000).** Bacteria indicators dynamics in wells as influenced by well depth and well water column thickness, in Yaounde (Cameroon). *African Journal of Science and Technology*, 1(2): 82-91.
- Nola M, Njiné T, Djuikom E & Sikati Foko V (2002).** Faecal coliforms and faecal Streptococci community in the underground water, in an equatorial area in Cameroon (Central Africa): The importance of some environmental chemical factors. *Water Research*, (36): 3289-3297
- Nola M, Njiné T, Kemka N, Zébazé Togouet SH, Servais P, Messouli M, Boutin Cl, Monkiedje A & Foto Menbohan S (2006).** Transfert des bactéries fécales vers une nappe phréatique à travers une colonne de sol en région équatoriale : influence de la charge en eau appliquée en surface. *Revue des Sciences de l'Eau / Journal of Water Science*, 19(2): 101-112.
- Notemboom J (1991).** Marine regressions and the evolution of groundwater dwelling amphipods (Crustacea). *Journal of Biogeography*, 18: 437-454.
- Nougang ME, Nola M, Djuikom E, Noah OV, Mougang ELM & Bessa HA (2011).** Abundance of Faecal Coliforms and Pathogenic *E. 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(6): 622-632.
- Ntow WJ (2001).** Organochlorine pesticides in water, sediment, crops, and human fluids in a farming community in Ghana. *Archives Environmental Contamination Toxicology*, 40: 557-563.
- Odoulami L (2009).** *La problématique de l'eau potable et la santé humaine dans la ville de Cotonou (République du Bénin)*. Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Géographie et Gestion de l'Environnement, 230p.
- Organisation Mondiale de la Santé, OMS (1986).** Directives de qualité pour l'eau de boisson : Contrôle de qualité de l'eau de boisson destinée à l'approvisionnement des petites collectivités. Genève, vol.3, 121p.
- Organisation Mondiale de la Santé (2011).** Directives de qualité pour l'eau de boisson. Quatrième édition. Publication Organisation Mondiale de la Santé. Genève, Suisse. 307-447p.
- Organisation Mondiale de la Santé (1997).** Guideline for Drinking Water Quality 2<sup>nd</sup> Edition. Volume 3, Surveillance and Control of Community Supplies, Geneva, 238p.
- Organisation Mondiale de la Santé (2004).** *Liens entre l'eau, l'assainissement, l'hygiène et la santé faits et chiffres - mise à jour de novembre 2004*. Organisation Mondiale de la Santé, Genève. 110p.
- Organisation Mondiale de la Santé (1971).** Normes européennes applicables à l'eau de boisson : 2<sup>e</sup> édition, 62p.
- OMS/UNICEF (2008).** Un Aperçu de la situation de l'eau potable en Afrique. 11<sup>ème</sup> Sommet des Chefs d'Etat et de Gouvernement de l'Union Africaine sur le thème : réalisation des Objectifs du Millénaire concernant l'Eau et l'Assainissement, 13p.
- OMS/UNICEF, JMP (2019).** Progrès en matière d'eau, d'assainissement et d'hygiène des ménages, 140p.
- Onda K, Lobuglio J & Bartram J (2012).** Global Access to Safe Water: Accounting for Water Quality and the Resulting Impact on MDG Progress. *International Journal of Environmental Research Public Health* 9(3): 880-894.
- ONU-EAU (2021).** Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau. Valeur de l'eau, 226p.
- PADUR-Tchad (2008).** Etudes impact environnemental et social-sous-projets PADUR-Ville de Moundou Urbaplan, 75p.

- Paran F, Malard F, Mathieu J, Lafont M, Galassi DMP & Marmonier P (2005).** Distribution of groundwater invertebrates along an environmental gradient in a shallow water-table aquifer. In: *Proceedings of an International Symposium on World Subterranean Biodiversity* (édition Juan Gibert), 99-105p.
- Pascalis (2009).** Towards an optimal sampling strategy to assess groundwater biodiversity: comparison across six European regions. *Freshwater Biology*, 54: 777-796.
- Patel U, Yan Y.P, Hobbs FWJr, Kaczmarczyk J, Slee AM, Pompliano DL, Kurilla MG & Bobkova EV (2001).** Oxazolidinones mechanism of action: Inhibition of the first peptide bond formation. *Journal of Biological and Chemistry*, 276 :37199-37205.
- Pavard P (2013).** Nitrates et Santé : l'Etonnante Contre-Enquête. *La France Agricole*, 14 : 42-44
- Payment P & Hartemann P (1998).** Les contaminants de l'eau et leurs effets sur la santé. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 1: 199-210.
- Payment P, Waite M & Dufour A (2003).** *Introducing parameters for the assessment of drinking water quality*. In *Assessing microbial safety of drinking water*, OECD edition, Geneva, 452p.
- Peter FM (2010).** Teunis, Fumiko Kasuga, Aamir Fazil, Iain D. Ogden, Ovidiu Rotariu and Norval J.C. Strachan, Dose-response modeling of Salmonella using outbreak data. *International Journal of Food Microbiology* 144: 243-249.
- Pierre P & Yves L (2011).** Les eaux de consommation humaine et la santé publique en France métropolitaine. *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine*, 195(2) : 403-429
- Pipan T (2005).** Epikarst -A Promising Habitat. Copepod Fauna, its diversity and ecology: A case Study from Slovenia (Europe). *ZRC Publishing, Karst Research at ZRC SAZU, Ljubljana*, 101p.
- Pipan T, Blejec A & Brancelj A (2006).** - Multivariate analysis of copepod assemblage in epikarstic waters of some Slovenia caves. *Hydrobiologia*, 559: 213-223.
- 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)*, 11p.
- 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: 4373-4380
- Poisson A (2011)**. Désinfection dans des réseaux de distribution d'eau potable : efficacité de traitements sur des biofilms et importance des méthodes d'évaluation. *Anses. Bulletin de Veille Scientifique. Santé / Environnement / Travail*, 13: 53-55.
- Poulson TL (1963)**. Cave Adaptation in Amblyopsid Fishes. *The American Midland Naturalist*, 70 (2): 257-290
- Programme des Nations Unies pour le Développement, PNUD (1990)**. « Déclaration de New Delhi ». In consultation mondial sur l'eau potable et l'assainissement pour les années 1990, New Delhi (inde), 8p
- PS-Eau (2012)**. Accès à l'eau potable dans les pays en développement, 18 questions pour des services durables, Guide pratique, 50p.
- Raimond C, Sylvestre F, Zakinet D & Moussa A (2019)**. Le Tchad des lacs: les zones humides sahéliennes au défi du changement global. Marseille: IRD Editions, 15-31p.
- Ramzi H, Hichem K, Lylia R, Djemoui M & Menouar S (2020)**. Impact of Anthropogenic Pressure on the Quality and Diversity of Groundwater in the Region of Sighus Oum-El-Bouaghi and El Rahmounia, Algeria., *Journal of Bioresource Management*, 7(3): 85-105
- Ravi CBR, Chandana OSS, Sudarsana RT & Suresh KJ (2006)**. "Study on evaluation of groundwater pollution potential in Bukkannapalem, Madhurwada, Visakhapatnam", *Nature, Environment and Pollution Technology*. 5 (2): 203-207
- Réseau Francophone sur l'Eau et l'Assainissement, RéFEA (2019)**. L'eau et l'assainissement. Lianes coopération, 36p.
- Regnault JP (1990)**. Microbiologie générale, Paris, Vigot, 859p.
- Rice EW (1999)**. Water borne pathogens: Escherichia coli. *American Water Works Association*, 75-78p.
- Rodier (1984)** : Analyse de l'eau naturelle, résiduaire et de mer. 7<sup>ème</sup> édition, 1365p.
- Rodier J, Legube B, Merletet N, Brunet R, Mialocq Jc, Leroy P & Houssin M (2009)**. *L'analyse de l'eau* (Eds). Dunod, Paris, 9e édition, 1579p.
- Rosenbach FJ (1884)**. Microorganism en bei den Wund-Infektions-Krankheiten des Menschen. Bergmann, *Advance in Microbiology*, 8(1) : 223-412
- Rosillon F (2003)**. Introduction à la microbiologie des eaux domestiques. Stage intensif de recyclage sur les eaux usées domestiques et industrielles, Direction de l'Hygiène et de

- l'Assainissement de Base (DHAB). Fondation Universitaire Luxembourgeoise 6700 Arlon (Belgique), 26p.
- Rouch R & Ginet R (1983).** Recherche sur l'écosystème aquatique karstique, *In Travaux français en limnologie*, 27<sup>ème</sup> congrès S.I.L., Lyon, France : 261-269
- Safia MT (2021).** *Biodiversité et structure de la communauté zooplanctonique (Rotifères, Cladocères, Copépodes) du lac Léré au TCHAD.* Thèse de Doctorat/Ph.D, Faculté des Sciences. Université de Yaoundé I, 235p.
- Safia MT, Brahim B O, Mikail A I, Tchakonte S, Enah Dickson A & Zébazé Togouet SH (2020).** Spatio-temporal dynamics of zooplankton communities (Rotifers, Cladocerans, Copépodes) and water quality of Lake Léré (TCHAD). *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 5(3): 2456-1878
- Santé et Bien-être social Canada (1982).** Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada 1978. Pièces à l'appui. Approvisionnement et Services Canada, Hull, 26p.
- Satur A & Touazit A (2018):** *Bio-Evaluation de la Qualité des Eaux Souterraines de la Région de Souk Naamane et Ain M'lila (Oum El Bouaghi, Haute Plaine de l'Est Algérien).* Mémoire de Master. Université de Larbi Bn M'hidi Oum El Bouaghi, Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie, 86p.
- Schoeller HJ (1975).** La pollution des eaux souterraines. *International Association of Hydrological Sciences (IAHS) Publication*, N°103, 7p.
- Senou Olawalé SFR, Josse RG, R Toklo M, K. Fatombi J, Topanou N & Coulomb B (2017).** Caractérisation physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines de la ville de Bembèrèkè au Nord-Est du Bénin, *International Journal of Innovation and Applied Studies* 23(1) : 1-9
- Servais P, Billen G, Garcia-Armisen T, George I, Goncalvez A & Thibert S (2009).** La contamination microbienne dans le bassin de la Seine. Edition. Agence de l'Eau Seine Normandie, 49p.
- Shannon CE & Weaver W (1949).** *The mathematical theory of communication.* University Illinois press, Urbana, Etat-Unis. 117p.
- Sharpe RM & Skakkebaek NE (1993).** Are oestrogens involved in falling sperm counts and disorders of the male reproductive, *Elseviert*, 341: 1392-1395.
- Sherer BM, Miner JR, Moore JA & Buckhouse JC (1992).** Indicator bacterial survival in stream sediments. *International Journal of Environment Quality*, 21: 291-295
- Sinton LW (1984).** The macroinvertebrates in a sewage polluted aquifer. *Hydrobiologia*, 119: 161-169.

- Slepukhina TD (1984).** Comparison of Different Methods of Water Quality Evaluation by Means of Oligochaetes. *Hydrobiology*, 115: 183-186.
- Soncy K, Djeri B, Anani K, Eklou-Lawson M, Adjrah Y, Karou DS, Ameyapoh Y & De Souza C (2015).** Évaluation de la qualité bactériologique des eaux de puits et de forage à Lomé, Togo. *Journal of Applied Biosciences*, 91: 8464-8469
- Soro N, Ouattara L, Dongo K, Kouadio E K, Ahoussi EK, Soro G, Oga MS, Savane I & Biemi J (2010).** Déchets municipaux dans le District d'Abidjan en Côte d'Ivoire : sources potentielles de pollution des eaux souterraines. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4(6): 2203-2219.
- Spuhler D (2009).** *The influence of Fe (II), Fe (III) and the photo-Fenton reagent on Solar Water Disinfection. Basic. Assessment at Laboratory Scale*, 199p.
- Srinivas P, Pradeep KGN, Srinivasa PA & Hemalatha T (2011).** Generation of Groundwater Quality Index Map –A Case Study, *Civil and Environmental Research*, 01(2):10-17
- Stellaman JM (2000).** Encyclopédie de sécurité et de santé au travail volume 2, Edition Organisation internationale du Travail, 4838p.
- Stoch F (1995).** The ecological and historical determinants of crustacean diversity in groundwaters, or: why are there so many species. *Mémoires de Biospéologie*, XXII, 139–160p.
- Sy I, Koita M, Traoré D, Keita M, Lo B, Tanne M & Cissé G (2011).** Vulnérabilité sanitaire et environnementale dans les quartiers défavorisés de Nouakchott (Mauritanie) : analyse des conditions d'émergence et de développement des maladies en milieu urbain sahélien. *[VertigO] Revue en sciences de l'Environnement*, 11(2): 17p.
- Tachet H, Richoux P, Bournaud M & Usseglio-Polatera P (2010).** *Invertébrés d'eau douce : Systématique, biologie et écologie*. Nouvelle édition, revue et augmentée, CNRS édition, Paris, France, 607p.
- Taloro KP & Chess B (2012).** Foundations: Microbiology Medical. New York, USA, 579 p.
- Tamungang NEB, Biosengazeh NF, Alakeh MN & Tameu DY (2016).** Contrôle de la qualité des eaux domestiques dans le village Babessi au Nord-Ouest Cameroun, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 10(3):1382-1402
- Tchadanaye NM (2007).** *Problématique de l'eau et qualité de l'eau au Tchad*. Rapport final des résultats des analyses de la qualité des eaux de consommations, 25p.
- Thienemann A (1925).** Die Binnengewässer Mitteleuropa. In: Die Binnenge Wässer. *Einzeldarstellungaus der Limnologieundihren Nachbargebieten*, n°1, 255p.

- Tuekam Kayo RP (2007).** *Stygofaune de deux bassins versants souterrains contigus de la région de Yaoundé : influence de la pression Anthropique.* Mémoire de DEA. Faculté des Sciences. Université de Yaoundé I, Cameroun, 69p
- Tuekam Kayo RP (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/PhD, Faculté des Sciences. Université de Yaoundé I, 291p.
- Turquin MJ (1980).** La pollution des eaux souterraines : incidences sur les biocénoses cavernicoles. *1<sup>er</sup> Colloque National sur la Protection des eaux. Eaux Souterraines Karstiques, Besançon*, 341-347p.
- Van der Werf H (1996).** Assessing the impact of the pesticides on the environnement. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 60: 81-96
- Vandel A (1964).** *Biospéologie : La biologie des animaux cavernicoles.* Editions Gauthier-Villars, Paris, 619p.
- Vaute L (1999).** Identification d'éléments indésirables ou toxiques dans les ressources en eau potentielles du bassin ferrifère lorrain. Rapport BRGM R40908, 37p.
- Vilaginès R (2003).** *Eau, environnement et santé publique.* Lavoisier édition. Paris, 236p.
- Vincent W, Uhl Jaclyn A, Baron William W, Davis Dennis B, Warner C & Seremet C (2009).** Exploitation des eaux souterraines. Concepts de base pour l'élargissement des Programmes d'hydraulique du CRS (Catholic relief services). (Secours Catholique), 81p.
- Vissin EW, Aimade HSS, Dougnon LD, Sohounou MAEY & Atchade GAA (2016).** Qualité de l'eau et maladies hydriques dans la commune de Toffo (Bénin, Afrique de l'ouest). *Journal of Applied Biosciences*; 106:10300-10308
- Viraraghavan T, Subramanian KS & Venkata Rao B (1999).** Impact of household plumbing fixtures on drinking water quality, a review, *International Journal of Environment Studies*, 56: 717-743.
- Williams DD & Hynes HBN (1974).** The occurrence of ben- thos deep in the substratum of a stream. *Freshwater Biology*, 4: 233-256.
- Worm J & Hattum TV (2006).** La collecte de l'eau de pluie à usage domestique. *Agrodok* 43, 86p.
- Yacoubi-Khebiza M (1990).** *Écologie, biogéographie des biocénoses aquatiques des nappes alluviales de quelques vallées du Haut-Atlas de Marrakech (Maroc).* Paléogéographie des Crustacés phréatobies. Doctorat d'Etat 3e cycle, Faculté de Science Semlalia,

Marrakech, 246p.

- Yacoubi-Khebiza M (1996).** *Biocénoses aquatiques interstitielles des vallées du Haut-atlas de Marrakech : Microdistribution, Dynamique de répartition, écologie et biogéographie.* Thèse Doctorat d'État, Faculté de Science Semlalia, Marrakech, 374p.
- Yala. D, Merad AS, Mohamedi D & Ouar Korich MN (2001).** Classification et mode d'action des antibiotiques, *Médecine du Maghreb*, 91: 1-12.
- Yao KR (2019).** *Caractérisation phénotypiques et moléculaire de Salmonella sp et Escherichia coli isolées chez les bovins dans le district d'Abidjan (Côte d'Ivoire): impact biologique de l'utilisation des antibiotiques.* Thèse de Doctorat/Ph.D. Université Félix HOUPHOUET BOIGNY, 241p
- Yao TK, Oga MS, Fouché O, Baka D, Pernelle C & Biemi J (2012).** Évaluation de la potabilité chimique des eaux souterraines dans un bassin versant tropical : cas du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6(6) : 7069-7086
- Yapo RI, Mambo V, Alder AC, Ohou-Yao MJ, Ligban R, Dao D, Stamm C & Bonfoh B (2016).** Caractérisation saisonnière des eaux de puits à usage maraîchère et domestique de Korhogo (Côte d'Ivoire), *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 10(3): 1433-1449
- Yapo OB, Mambo V, Seka A, Ohou MJA, Konan F, Gouzile V, Tidou AS, Kouamé KV & Houénou P (2010).** Evaluation de la qualité des eaux de puits à usage domestique dans les quartiers défavorisés quatre communes d'Abidjan (Côte d'Ivoire): Koumassi, Marcory, Portbouet et Treichville. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4(2): 289-307.
- Yélognissè CLHH (2007).** *Amélioration des conditions d'accès à une eau potable pour l'eau de boisson dans les milieux ruraux du Bénin : étude des pratiques locales.* Maîtrise en sciences de l'environnement, Université du Québec à Montréal, 117p.
- Youmbi Tabué JG, Feumba R, Njita Tsama V, Marsily G & Ekodeck GE (2013).** Pollution de l'eau souterraine et risques sanitaires à Yaoundé, *C.R. Biologies*, 310-316
- Zébazé Togouet SH (2004).** *Recherche d'espèces animales indicatrices de la qualité des eaux souterraines du Cameroun.* Rapport de stage postdoctoral à l'Université de Toulouse III. Agence Universitaire de la Francophonie, Université de Yaoundé I, 41p.
- Zébazé Togouet SH., Boulanouar M, Njine T & Boutin C (2013).** First discovery of a Stenasellidae (Crustacea, Isopoda, Aselloidea) in the groundwaters of Cameroon (Central Africa): description, origin and palaeogeographic implications of

*Metastenasellus camerounensis* n. sp. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Toulouse*, 149: 153-166

**Zébazé Togouet SH, 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.

**Zébazé Togouet SH, Tuekam Kayo RP, 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 Yaoundé (Cameroun, Afrique Centrale). *Bulletin de la Société d'histoire Naturelle de Toulouse*, 147: 27-41

**Zerhouni J, Rhazi Filali F & Aboukacem A (2015).** Qualité et facteurs de risque de pollution des eaux souterraines périurbaines de la ville de Sebaa Ayoun (Meknes, Maroc). *Larhyss Journal*, 22: 91-107.

**Zgheib S (2009).** Flux et sources des polluants prioritaires dans les eaux urbaines en lien avec l'usage du territoire. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Centre d'Enseignement et de Recherche sur l'Eau, la Ville et l'Environnement, 349p.

A decorative horizontal border with a scroll-like appearance on the left and right ends, enclosing the text.

# **ANNEXES**

**Annexe 1:** Caractéristiques physiques des puits échantillonnés : Alt= altitude, NP= niveau piézométrique, CE= épaisseur de la colonne d'eau, Prof= Profondeur du puits, Dtre.= diamètres des puits, HMarg= hauteur de la margelle, Dlat= distance du puits avec la latrine.

Arrndissements	Stations	Alt	NP		CE		Prof	Dtre	HMarg	Dlat
			SP	SS	SP	SS				
1 <sup>er</sup> arrondissement	P5	401	4,65	0,765	6,8	2,86	11,45	0,66	0,48	19,8
	P6	405	3,11	2,915	5,24	2,37	8,35	1	0,6	16,6
	P7	396	4,55	1,935	6,3	1,67	10,85	0,9	0,53	14,63
	P8	405	1,5	1,865	5,8	4,075	7,3	1,7	0,45	17,45
	P9	403	2,69	3,015	5	2,085	7,69	1	0,4	16,6
	P10	400	6,5	8,05	14,29	6,73	20,79	1,17	0,68	16,1
2 <sup>e</sup> arrondissement	P14	412	0,7	1,99	2,45	1,135	3,15	1	0,5	11
	P15	394	0,52	1,14	4,82	2,1	5,34	0,76	0,6	14,75
	P16	399	6,64	6,445	2,25	2,79	8,89	1,28	0,57	6,35
	P46	395	2,99	10,95	6,6	3,77	9,59	1,2	0,5	15,1
	P47	394	2,04	10,26	3,58	5,295	5,62	1,3	0,64	22,43
	P48	392	3,03	7,84	3,34	4,245	6,37	1,1	0,6	17,54
	P49	395	4,1	9,545	3,13	3,3	7,23	0,94	0,47	9,4
	P50	396	3,57	8,175	4,3	3,99	7,87	1,6	0,48	14,4
3 <sup>e</sup> arrondissement	P24	395	5,92	5,05	7,3	1,935	13,22	1,4	0,84	11,6
	P25	401	2,41	3,09	5,27	3,385	7,68	1,1	0,48	13,7
	P26	397	6,2	5,21	8,42	2,535	14,62	1,12	0,7	23,1
	P27	390	6,61	1,8	6,2	1,885	12,81	1,2	0,85	10,1
	P28	388	5,1	4,86	9,6	4,32	14,7	1,21	0,72	10
	P29	392	4,37	4,195	6,37	2,3	10,74	1,18	0,64	16
	P30	397	4,71	4,725	7,56	2,35	12,27	0,3	0,9	24
	P31	391	3,79	3,915	6,7	1,465	10,49	1	0,7	17,7
	P32	398	1,36	3	2,22	1,945	3,58	0,92	0,4	25,9
	P40	406	7,14	6,455	3,97	3,18	11,11	0,62	0,75	7
	P41	396	4,78	3,97	2,43	3,4	7,21	0,9	0,5	0
	P42	395	1,6	2,11	3,44	4,495	5,04	0,63	0,57	23
	P43	403	1,72	4,565	6,33	5,725	8,05	1,26	0,6	16,8
	P44	396	3,02	10,175	2,65	3,43	5,67	1,64	0,2	12,1
	P45	400	4,32	10,01	3,3	7,96	7,62	0,74	0,63	23
	P1	419	2,42	2,37	2,39	1,675	4,81	0,75	0,53	45
	P2	402	2,31	2,14	3,75	1,82	6,06	0,74	0,88	12,6

4 <sup>e</sup> arrondissement	P3	405	0,58	1,15	3	2,35	3,58	1,14	0,63	10,2
	P4	401	2,45	4,17	7,98	4,35	10,43	1,4	0,95	10,1
	P11	408	2,38	6,285	11,42	5,41	13,8	1,12	0,45	18,4
	P12	403	8,41	5,93	10,5	4,82	18,91	0,1	55	12,5
	P13	400	2,39	3,88	6,48	2,89	8,87	1,3	0,78	0,9
	P17	400	1,46	1,37	7,3	3,2	8,76	1,15	0,57	11,45
	P18	405	1,39	3,68	7,34	4,085	8,73	0,76	0,68	10,6
	P19	396	5,9	5,255	10,56	5,425	16,46	1,3	0,82	7,5
	P20	395	0,75	4,905	9,12	5,445	9,87	1,6	0,8	6,1
	P21	405	5,48	6,175	10,74	4,345	16,22	1,16	0,5	13,85
	P22	401	5,56	5,92	11,53	5,575	17,09	0,94	0,78	7
	P23	397	4,4	4,575	7,26	2,885	11,66	0,92	0,55	10,7
	P33	405	7,77	7,77	2,18	2,18	9,95	1,3	0,7	36,45
	P34	404	3,8	4,42	7,79	2,21	11,59	1,5	79	13,72
	P35	401	1,98	2,41	9,17	3,805	11,15	1	1	6,1
	P36	400	5,95	1,78	6,78	0,67	12,73	1,26	0,67	13,62
	P37	401	0,87	1,84	7,75	4,815	8,62	1	0,68	6,3
	P38	398	4,61	4,965	3,45	7,74	8,06	0,93	0,62	13,1
	P39	401	1,12	3,62	7,72	5,35	8,84	0,9	0,66	17,6

**Annexe 2:** Récapitulatif des valeurs minimales (Min), maximales (Max), moyennes (Moy) ± écart-tpes ( $\sigma$ ) des paramètres physicochimiques et bactériologiques mesurés pour l'ensemble des puits de Moundou pendant la période d'étude

Paramètres	Minimum	Maximum	Mean ± St.D
Température (°C)	27,20	30,35	28,77 ± 0,70
pH (UC)	5,87	7,74	6,77 ± 0,56
Alcalinité (mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub> )	12,00	334,00	37,69 ± 32,04
MES (mg.L <sup>-1</sup> )	2,00	373,00	35,28 ± 42,32
Turbidité (FTU)	0,70	80,80	13,92 ± 12,61
Couleur (Pt-Co)	0,00	1000,00	95,27 ± 166,30
Conductivité électrique (µS/Cm)	187,00	6230,00	1204,9 ± 1125,62
TDS (mg.L <sup>-1</sup> )	112,55	3150,00	604,29 ± 558,30
Dureté totale (mg.L <sup>-1</sup> )	130,00	5900,00	1502 ± 1129,58
O <sub>2</sub> saturatin (%)	18	89	58 ± 0,58
CO <sub>2</sub> dissus (mg.L <sup>-1</sup> )	15,00	96,20	41,10 ± 17,86
DBO <sub>5</sub> (mg.L <sup>-1</sup> O <sub>2</sub> )	50,64	278,52	151,45 ± 48,00
DCO (mg.L <sup>-1</sup> O <sub>2</sub> )	110,00	1563,00	526,92 ± 284,70
Matière organique (mg.L <sup>-1</sup> )	0,00	9,50	3,37 ± 2,28
Nitrites (mg.L <sup>-1</sup> NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	0,00	800,05	38,22 ± 118,88
Nitrates (mg.L <sup>-1</sup> NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	0,00	115,18	3,04 ± 15,63
Amomnium (mg.L <sup>-1</sup> NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	0,00	1,34	,1519 ± 0,31
Orthphosphates (mg.L <sup>-1</sup> PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	0,00	290,00	60,58 ± 54,97
Sulfates (mg.L <sup>-1</sup> SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	0,00	175,00	30,39 ± 30,56
Fluor (mg.L <sup>-1</sup> F <sup>-</sup> )	0,00	,92	0,15 ± 0,22
Fer (mg.L <sup>-1</sup> )	0,00	1,27	0,65 ± 0,37
Bicarbonates (mg.L <sup>-1</sup> HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	5,00	210,00	82,93 ± 47,08
FMAT (UFC/mL)	27	3532	627 ± 560
CT (UFC/mL)	0	1404	171 ± 265
CF (UFC/mL)	0	564	86 ± 133
STA (UFC/mL)	0	336	11 ± 18
EC (UFC/100mL)	0	124	65 ± 82
SAL (UFC/100mL)	0	116	10 ± 17

**Annexe 3:** Valeurs saisonnières moyennes (Moy) ± écart-types ( $\sigma$ ) des paramètres physicochimiques et bactériologiques mesurés pendant la période d'étude par arrondissement.

Paramètres	Arrondissements				
		I	II	III	IV
Température (°C)	SP	28,75 ± 0,17	28,74 ± 0,41	28,42 ± 0,72	28,40 ± 0,75
	SS	28,77 ± 0,55	29,69 ± 0,58	28,45 ± 0,63	28,72 ± 0,63
	F	0,005	12,22	0,007	7,14
	p	0,94	0,01*	0,93	0,01*
pH (UC)	SP	6,01 ± 0,14	6,39 ± 0,18	6,18 ± 0,15	6,37 ± 0,28
	SS	7,41 ± 0,29	7,22 ± 0,25	7,13 ± 0,23	7,35 ± 0,20
	F	113,3	74,82	258,6	157,1
	p	0,0001***	< 0,0001****	< 0,0001****	< 0,0001****
Alcalinité (mg.L <sup>-1</sup> CaCO <sub>3</sub> )	SP	40,67 ± 8,91	40,63 ± 8,36	34,93 ± 5,81	35,71 ± 16,09
	SS	33,33 ± 9,13	39,88 ± 10,76	26,47 ± 10,03	33,81 ± 10,01
	F	2,27	0,024	7,66	0,21
	p	0,19	0,87	0,01*	0,64
MES (mg.L <sup>-1</sup> )	SP	28,33 ± 13,97	20,25 ± 18,81	49,73 ± 90,81	25,67 ± 17,29
	SS	47,33 ± 25,13	30,56 ± 22,56	32,63 ± 18,79	42,52 ± 39,6
	F	3,92	1,36	0,52	2,91
	p	0,10	0,28	0,48	0,1
Turbidité (FTU)	SP	13,92 ± 18,46	2,25 ± 2,15	15,71 ± 18,29	10,38 ± 18,56
	SS	16,58 ± 14,50	13,75 ± 10,15	19,27 ± 15,42	20,04 ± 19,83
	F	0,07	9,96	0,6	10
	p	0,79	0,01*	0,44	0,003**
Couleur (Pt-Co)	SP	25 ± 61,24	9,37 ± 18,79	153,7 ± 322,7	59,05 ± 84,61
	SS	142,9 ± 113,6	48,78 ± 47,71	106 ± 93,94	139 ± 179,8
	F	4,47	6,95	0,44	8,56
	p	0,08	0,03*	0,51	0,008**
Conductivité électrique (µS/Cm)	SP	917 ± 983,5	2559 ± 1922	954,7 ± 876,1	1348 ± 1354
	SS	723,4 ± 749,4	1902 ± 741,2	695,2 ± 359,5	1043 ± 794,3
	F	3,26	1,15	2,09	2,48
	p	0,13	0,31	0,16	0,13

TDS (mg.L <sup>-1</sup> )	SP SS F p	442,8 ± 429 359,6 ± 368,8 4,98 0,07	1274 ± 956,9 944,8 ± 366,3 1,16 0,31	497 ± 426,1 347,5 ± 180,7 2,94 0,10	678 ± 682,4 521,9 ± 396,9 2,46 0,13
Dureté totale (mg.L <sup>-1</sup> )	SP SS F p	787,2 ± 741,5 701,5 ± 664,9 2,98 0,14	2888 ± 1113 1921 ± 608,7 22,15 0,002**	1389 ± 1072 1349 ± 824,5 0,02 0,087	1742 ± 1490 1197 ± 799,3 8,42 0,008**
O <sub>2</sub> saturation (%)	SP SS F p	50,8 ± 23,49 12,78 ± 5,77 18,39 0,007**	49,25 ± 21,06 14,55 ± 6,64 36,28 0,0005***	46,8 ± 16,20 15,65 ± 4,73 84,95 < 0,0001****	42 ± 17,12 53,89 ± 18,27 5,36 0,03*
CO <sub>2</sub> dissous (mg.L <sup>-1</sup> )	SP SS F p	27,93 ± 12,63 28,03 ± 9,19 0,0001 0,97	41,65 ± 14,38 60,34 ± 31,61 11,15 0,01*	36,48 ± 12,07 60,73 ± 17,29 36,59 < 0,0001****	31,54 ± 12,18 39,90 ± 11,73 9,92 0,005**
DBO <sub>5</sub> (mg.L <sup>-1</sup> O <sub>2</sub> )	SP SS F P	246,9 ± 23,38 146,3 ± 24,08 45,77 0,001**	179,4 ± 54,84 112,62 ± 28,64 17,52 0,004**	131,7 ± 21,29 127,5 ± 30 0,19 0,66	174,6 ± 48,91 137,9 ± 36,23 8,91 0,007**
DCO (mg.L <sup>-1</sup> O <sub>2</sub> )	SP SS F P	622 ± 466,84 563,33 ± 112,3 0,12 0,73	610,3 ± 242,4 621,5 ± 1876 0,009 0,92	646,7 ± 353,8 434,5 ± 155,1 3,92 0,06	504 ± 365,9 424,9 ± 185,1 0,78 0,38
Matière organique (mg.L <sup>-1</sup> )	SP SS F P	2 ± 1,78 3,41 ± 0,73 4,09 0,09	3,62 ± 2,77 5,43 ± 2,44 1,48 0,26	4,4 ± 2,74 3,3 ± 1,78 1,90 0,18	2,52 ± 2,08 3,02 ± 2,07 1,90 0,18
Nitrites (mg.L <sup>-1</sup> NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	SP SS F p	0,14 ± 0,07 11,29 ± 8,14 11,34 0,019	0,2 ± 0,27 27,65 ± 29,46 6,94 0,03*	0,19 ± 0,20 31,90 ± 25,88 22,5 0,0003***	0,28 ± 0,25 26,05 ± 28,38 17,30 0,0005***

Nitrates (mg.L <sup>-1</sup> NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	SP	0,19 ± 0,09	0,19 ± 0,38	0,32 ± 0,45	0,29 ± 0,42
	SS	0,56 ± 0,24	6,97 ± 14,23	1,52 ± 3,78	0,87 ± 0,68
	F	16,60	1,79	1,45	11,49
	p	0,009**	0,22	0,24	0,002**
Ammonium (mg.L <sup>-1</sup> NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	SP	0,001 ± 0,003	0 ± 0	0,03 ± 0,07	0,039 ± 0,13
	SS	0,09 ± 0,12	0,26 ± 0,33	0,35 ± 0,48	0,27 ± 0,39
	F	3,37	5,15	6,95	6,83
	p	0,12	0,057	0,01*	0,01*
Orthophosphates (mg.L <sup>-1</sup> PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	SP	0,33 ± 0,08	93,06 ± 77,76 60,94	66,83 ± 84,17	35,53 ± 54,23 74,19
	SS	110,7 ± 23	± 34,46	57,05 ± 28,26	± 25,88
	F	138,8	0,68	0,13	5,79
	p	< 0,0001****	0,43	0,72	0,02*
Sulfates (mg.L <sup>-1</sup> SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	SP	10,67 ± 26,13	79,5 ± 48,50	22,13 ± 24,65	16,33 ± 19,31
	SS	19,17 ± 26,95	66,69 ± 20,44	22,63 ± 14,78	32,21 ± 19,96
	F	23,82	1,07	0,007	27,24
	p	0,004**	0,33	0,93	< 0,0001****
Fluor (mg.L <sup>-1</sup> F <sup>-</sup> )	SP	0,28 ± 0,25	0,89 ± 0,29	0,24 ± 0,26	0,48 ± 0,38
	SS	0,99 ± 0,23	0,99 ± 0,23	0,88 ± 0,15	0,76 ± 0,28
	F	41,84	0,42	95,14	6,97
	p	0,001**	0,53	< 0,0001****	0,01*
Fer (mg.L <sup>-1</sup> )	SP	0,05 ± 0,10	0,025 ± 0,04	0,10 ± 0,24	0,12 ± 0,22
	SS	0,21 ± 0,18	0,076 ± 0,078	0,27 ± 0,21	0,23 ± 0,26
	F	9	1,98	6,63	2,80
	p	0,03*	0,20	0,02*	0,10
Bicarbonates (mg.L <sup>-1</sup> HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	SP	72,5 ± 21,62	94,38 ± 73,60	95,87 ± 50,72	72,86 ± 47,84
	SS	67,92 ± 18,94	90,31 ± 47,22	89,50 ± 54,77	79,17 ± 38,06
	F	0,30	0,01	0,13	0,16
	p	0,60	0,89	0,71	0,68
FMAT (UFC/mL)	SP	78,66 ± 46,57	298,75 ± 319,36	431,53 ± 723,87	188,19 ± 218,81
	SS	485,17 ± 228,22	642,38 ± 428,59	1556,5 ± 991,45	857,81 ± 774,78
	F	20,94	4,91	33,96	12,90
	p	0,006**	0,06	< 0,0001****	0,001**

CT (UFC/mL)	SP	20,16 ± 19,05	26,75 ± 19,27	52,26 ± 81,83	28,47 ± 25,51
	SS	95,16 ± 77,08	174 ± 188,67	519,47 ± 345,98	268,05 ± 311,54
	F	7,73	4,74	31,29	12,63
	p	0,03*	0,06	< 0,0001****	0,002**
CF (UFC/mL)	SP	7,33 ± 7,28	14,37 ± 8,99	28,06 ± 49,42	18,23 ± 23,10
	SS	50 ± 37,21	112,88 ± 136,52	251,67 ± 175,55	128,19 ± 152,91
	F	9,95	4,26	29,06	11,34
	p	0,02*	0,07	< 0,0001****	0,003**
STA (UFC/mL)	SP	0,16 ± 0,41	31,25 ± 56,14	24,13 ± 49,62	26,47 ± 52,14
	SS	32,16 ± 22,35	90,37 ± 72,94	156,17 ± 95,95	101,19 ± 82,11
	F	12,21	7,53	27,43	10,74
	p	0,01*	0,02*	0,0001***	0,003**
EC (UFC/100mL)	SP	1 ± 2	1 ± 1,93	1,46 ± 2,83	1,76 ± 3,82
	SS	3,16 ± 4,53	21 ± 13,34	29,06 ± 18,41	18,80 ± 27,70
	F	1,98	20,78	31,12	9,51
	p	0,21	0,002**	< 0,0001****	0,005**
SAL (UFC/100mL)	SP	0 ± 0	9,12 ± 20,43	1,2 ± 3,69	5,47 ± 12,99
	SS	24,33 ± 15,69	16 ± 12,32	16 ± 29,52	14,31 ± 17,08
	F	14,43	0,62	3,61	3,88
	p	0,01*	0,45	0,07	0,06

SP = saison des pluies ; SS = saison sèche ; F= test de Two -way ANOVA ; p = p-value ; (\*) = différence significative

**Annexe 4:** Données saisonnières des paramètres bactériologiques mesurés pendant la période d'étude.

Arrndissements	Statins	FMT		CT		CF		EC		ST		SAL	
		SP	SS	SP	SS	SP	SS	SP	SS	SP	SS	SP	SS
1 <sup>er</sup> arrondissement	P5	112	775	56	203	21	101	5	9	0	41	0	25
	P6	28	320	14	133	3	63	0	0	0	71	0	2
	P7	62	740	15	149	5	80	1	0	0	16	0	45
	P8	146	355	0	27	0	12	0	0	0	8	0	11
	P9	92	495	23	14	7	11	0	1	0	33	0	28
	P10	32	226	13	45	8	33	0	9	1	24	0	35
2 <sup>e</sup> arrondissement	P14	508	272	18	60	12	48	5	35	1	20	58	13
	P15	54	181	10	17	14	13	0	4	0	85	0	18
	P16	86	471	68	57	19	40	3	30	3	35	0	13
	P46	340	1092	34	442	32	333	0	22	104	258	0	44
	P47	979	883	14	469	4	325	0	23	138	87	0	6
	P48	98	392	12	19	9	3	0	0	2	60	0	6
	P49	55	463	22	250	6	101	0	36	1	98	0	9
	P50	270	1385	36	78	19	40	0	18	1	80	15	19
3 <sup>e</sup> arrondissement	P24	43	91	10	5	4	2	0	0	1	13	0	0
	P25	78	90	33	14	30	6	9	1	9	21	0	4
	P26	62	656	40	32	9	9	0	3	0	63	0	15
	P27	46	1964	13	408	6	270	0	26	0	161	4	29
	P28	66	2314	28	437	12	192	1	30	0	135	0	0
	P29	196	1213	11	908	10	424	0	53	2	207	0	2
	P30	107	506	16	211	6	105	0	18	0	97	0	0
	P31	27	2644	11	643	5	312	2	47	2	236	0	1
	P32	34	1071	28	268	18	110	0	18	6	67,5	0	12
	P40	32	1304	2	828	1	402	0	46	0	300	0	32
	P41	618	2216	214	934	100	360	7	38	8	305	14	0
	P42	1191	2292	17	896	6	310	0	37	113	288	0	4

	P43	1414	2096	39	710	14	496	0	58	55	142	0	12
	P44	58	1358	38	640	16	254	0	28	1	143	0	116
	P45	2501	3532	284	858	184	523	3	33	165	164	0	13
4 <sup>e</sup> arrondissement	P1	151	808	23	396	12	185	8	18	3	22	16	7
	P2	69	146	30	69	13	53	1	7	1	10	2	4
	P3	116	159	110	2	96	1	0	0	6	74	0	5
	P4	35	297	28	21	22	10	0	0	2	37	0	0
	P11	205	614	15	219	8	76	0	0	1	137	0	34
	P12	103	1082	77	602	62	522	12	124	69	29	13	68
	P13	96	330	2	88	1	40	1	11	1	43	0	39
	P17	37	198	25	59	18	38	0	20	0	25	0	0
	P18	29	500	19	183	6	69	0	39	3	54	0	5
	P19	76	410	4	121	2	86	0	11	0	139	0	14
	P20	129	484	25	122	20	42	0	0	1	149	0	31
	P21	891	202	5	0	0	0	0	0	210	38	0	0
	P22	502	836	18	214	13	70	0	13	0	59	0	0
	P23	560	234	8	17	0	4	0	0	110	58	56	10
	P33	90	2815	33	1404	22	564	12	34	17	336	9	23
	P34	27	2440	18	360	3	103	0	48	6	128	0	1,5
	P35	76	2172	12	221	6	152	1	22	57	134	0	16
	P36	199	782	26	372	20	185	1	11	67	148	19	14
	P37	366	1048	34	476	5	162	1	6	2	109	0	9
P38	152	1548	58	273	41	99	0	23	0	262	0	20	
P39	43	909	28	410	13	231	0	8	0	134	0	0	

FMAT= Flore mésophile aérobie totale, CT= Coliformes totaux, Coliformes fécaux, EC= *Escherichia coli*, ST= *Staphylococcus aureus*, SAL= *Salmonella* sp.

**Annexe 5:** Valeurs des coefficients de corrélation de Pearson (**n**) entre les variables physicochimiques dans les eaux de puits de la ville de Moundou pendant la période d'étude.

<b>Variables</b>	<b>T°C</b>	<b>MES</b>	<b>Turb</b>	<b>Coul</b>	<b>Cond</b>	<b>TDS</b>	<b>TH</b>	<b>DBO5</b>	<b>MO</b>	<b>NO2-</b>	<b>N03-</b>	<b>NH4+</b>	<b>PO4-</b>	<b>SO4-</b>	<b>Fe</b>	<b>F</b>
T°C	<b>1</b>															
MES	-0,163	<b>1</b>														
Turb	-0,208	<b>0,431</b>	<b>1</b>													
Coul	-0,171	<b>0,568</b>	<b>0,874</b>	<b>1</b>												
Cond	0,255	-0,159	-0,273	<b>-0,314</b>	<b>1</b>											
TDS	0,252	-0,166	-0,276	<b>-0,318</b>	<b>0,999</b>	<b>1</b>										
TH	0,231	-0,167	<b>-0,334</b>	<b>-0,370</b>	<b>0,784</b>	<b>0,786</b>	<b>1</b>									
DBO5	-0,212	0,023	0,076	0,012	-0,099	-0,111	<b>-0,333</b>	<b>1</b>								
MO	-0,004	0,278	-0,042	0,058	0,227	0,226	<b>0,296</b>	<b>-0,423</b>	<b>1</b>							
NO2-	-0,252	0,154	<b>0,377</b>	0,191	0,143	0,143	0,065	-0,074	-0,019	<b>1</b>						
N03-	0,046	-0,039	0,001	-0,051	0,227	0,226	0,164	-0,261	0,215	<b>0,509</b>	<b>1</b>					
NH4+	-0,203	0,232	0,061	-0,045	0,088	0,084	0,278	-0,069	0,212	<b>0,283</b>	0,245	<b>1</b>				
PO4-	-0,047	-0,012	-0,102	-0,216	<b>0,361</b>	<b>0,356</b>	<b>0,453</b>	-0,208	0,163	<b>0,356</b>	<b>0,321</b>	<b>0,367</b>	<b>1</b>			
SO4-	<b>0,424</b>	-0,021	-0,200	-0,183	<b>0,702</b>	<b>0,694</b>	<b>0,768</b>	-0,235	<b>0,369</b>	0,023	0,223	0,209	<b>0,378</b>	<b>1</b>		
Fe	<b>-0,304</b>	<b>0,369</b>	<b>0,761</b>	<b>0,727</b>	-0,189	-0,193	-0,127	0,016	-0,004	<b>0,358</b>	-0,064	0,036	-0,016	-0,144	<b>1</b>	
F	<b>0,409</b>	<b>-0,346</b>	<b>-0,483</b>	<b>-0,495</b>	<b>0,548</b>	<b>0,542</b>	<b>0,656</b>	-0,101	0,056	-0,012	0,212	0,146	<b>0,431</b>	<b>0,697</b>	<b>-0,328</b>	<b>1</b>

*Les valeurs des corrélations significatives  $p < 0,05$*

Cond= Conductivité électrique, Coul= Couleur, DBO<sub>5</sub>= Demande biologique en oxygène pendant 5 jours, Fe= fer, F= Fluor, MO= Matière organique, MES= Matière en Suspension, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>= Ammonium, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>= Nitrate, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>: Nitrites, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>= Sulfates, T°C= Température, TDS= Solides totaux dissous, TH= Dureté totale, Turb= Turbidité, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>= Phosphates.

**Annexe 6:** Valeur des coefficients de corrélation de Pearson (**n**) entre les variables morphohydrologiques et physicochimiques dans les eaux de puits de la ville de Moundou pendant la période d'étude.

Variables	Alt	NP	CE	Prof	Dtre	HM	Dlat
Alt	<b>1</b>						
NP	-0,243	<b>1</b>					
CE	-0,080	0,222	<b>1</b>				
Prof	-0,208	<b>0,788</b>	<b>0,775</b>	<b>1</b>			
Dtre	-0,255	0,131	0,107	0,152	<b>1</b>		
HM	0,142	0,127	0,133	0,166	-0,065	<b>1</b>	
Dlat	<b>0,300</b>	0,046	-0,247	-0,126	-0,173	-0,038	<b>1</b>
T°C	<b>-0,371</b>	0,112	0,054	0,106	0,029	0,000	-0,018
MES	0,148	-0,240	-0,166	-0,261	0,066	-0,049	-0,200
Turb	0,175	-0,116	0,013	-0,068	-0,018	-0,081	0,005
Coul	0,131	-0,158	-0,012	-0,110	0,029	-0,095	0,050
Cond	-0,130	-0,111	0,119	0,003	0,150	0,003	-0,233
TDS	-0,132	-0,112	0,112	-0,002	0,159	0,001	-0,235
TH	-0,113	-0,059	0,247	0,117	0,180	0,039	<b>-0,368</b>
DBO5	0,014	0,034	-0,058	-0,015	-0,147	-0,139	-0,095
MO	0,053	-0,113	0,061	-0,034	0,175	-0,145	-0,227
NO2-	0,229	0,096	0,015	0,071	0,156	0,114	0,196
NO3-	0,082	0,221	-0,139	0,055	0,074	-0,040	0,274
NH4+	0,259	0,154	0,231	0,246	-0,090	0,055	-0,182
PO4-	0,208	-0,062	0,235	0,108	0,020	0,143	-0,152
SO4-	-0,062	-0,089	<b>0,297</b>	0,130	0,104	-0,052	<b>-0,303</b>
Fe	<b>0,293</b>	-0,207	0,117	-0,060	-0,059	-0,095	0,007
F	-0,032	0,118	0,197	0,201	-0,003	0,218	-0,181

*Les valeurs des corrélations significatives  $p < 0,05$*

Alt= altitude, CE= Épaisseur de la colonne d'eau, Dtre = diamètres des puits, Dlat= distance du puits avec la latrine, HMMarg= hauteur de la margelle, NP= niveau piézométrique, Prof= Profondeur du puits. Cond= Conductivité électrique, Coul= Couleur, DBO<sub>5</sub>= Demande biologique en oxygène pendant 5 jours, Fe= fer, F= Fluor, MO= Matière organique, MES= Matière en Suspension, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>= Ammonium, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>= Nitrate, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>: Nitrites, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>= Sulfates, T°C= Température, TDS= Solides totaux dissous, TH= Dureté totale, Turb= Turbidité, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>= Phosphates

**Annexe 7:** Valeurs des coefficients de corrélation de Pearson (**n**) entre les variables morphohydrologiques et bactériologiques et entre les variables bactériologiques dans les eaux de puits de la ville de Moundou pendant la période d'étude.

Variabes	Alt	NP	CE	Prof	Dtre	HMarg	Dlat	FMAT	CT	CF	EC	ST	SAL
FMT	-0,141	0,250	-0,002	0,160	-0,029	0,125	0,193	<b>1</b>					
CT	-0,071	<b>0,324</b>	-0,172	0,102	-0,121	0,094	0,244	<b>0,776</b>	<b>1</b>				
CF	-0,064	<b>0,372</b>	-0,078	0,192	-0,194	0,149	0,219	<b>0,768</b>	<b>0,929</b>	<b>1</b>			
EC	0,032	<b>0,312</b>	-0,040	0,177	<b>-0,330</b>	<b>0,527</b>	0,024	<b>0,447</b>	<b>0,616</b>	<b>0,710</b>	<b>1</b>		
ST	-0,224	<b>0,352</b>	-0,006	0,225	-0,014	-0,024	0,087	<b>0,719</b>	<b>0,755</b>	<b>0,702</b>	<b>0,330</b>	<b>1</b>	
SAL	0,109	0,244	-0,091	0,101	-0,033	0,114	-0,069	-0,039	0,092	0,158	0,256	0,017	<b>1</b>

*Les valeurs des corrélations significatives  $p < 0,05$*

Alt= altitude, CE= Épaisseur de la colonne d'eau, Dtre = diamètres des puits, Dlat= distance du puits avec la latrine, HMarg= hauteur de la margelle, NP= niveau piézométrique, Prof= Profondeur du puits. Coliformes fécaux, CT= Coliformes totaux, FMAT= Flore mésophile aérobie totale, EC= *Escherichia coli*, SAL= *Salmonella* sp, ST= *Staphylococcus aureus*.

**Annexe 8:** Valeur des coefficients de corrélation de Pearson (**n**) entre les variables physicochimiques et bactériologiques dans les eaux de puits de la ville de Moundou pendant la période d'étude.

Variables	T°C	MES	Turb	Coul	Cond	TDS	TH	DBO5	MO	NO2-	NO3-	NH4+	PO4-	SO4-	Fe	F
FMAT	0,079	-0,131	0,067	0,062	-0,040	-0,041	-0,059	<b>-0,286</b>	0,003	0,082	0,185	-0,086	-0,115	-0,006	0,058	-0,047
CT	0,066	-0,159	0,022	0,018	-0,090	-0,087	-0,078	<b>-0,329</b>	-0,004	0,210	<b>0,351</b>	-0,011	-0,118	0,000	0,004	0,106
CF	0,096	-0,120	0,018	0,081	-0,092	-0,094	-0,094	-0,243	-0,047	0,099	0,246	0,019	-0,106	0,011	0,014	0,125
EC	0,093	-0,149	-0,102	-0,050	-0,082	-0,081	-0,007	-0,112	-0,144	-0,018	0,105	0,045	-0,049	-0,054	-0,007	0,257
ST	0,195	-0,040	-0,008	-0,050	0,073	0,065	0,089	<b>-0,286</b>	0,093	0,128	<b>0,369</b>	0,142	0,090	0,117	-0,031	0,123
SAL	-0,100	0,018	0,154	0,068	-0,099	-0,080	-0,048	0,055	-0,139	0,121	0,068	0,004	-0,024	-0,090	0,087	-0,091

Les valeurs des corrélations significatives  $p < 0,05$

Cond= Conductivité électrique, Coul= Couleur, DBO<sub>5</sub>= Demande biologique en oxygène pendant 5 jours, Fe= fer, F= Fluor, MO= Matière organique, MES= Matière en Suspension, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>= Ammonium, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>= Nitrate, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>: Nitrites, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>= Sulfates, T°C= Température, TDS= Solides totaux dissous, TH= Dureté totale, Turb= Turbidité, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>= Phosphates. Coliformes fécaux, CT= Coliformes totaux, FMAT= Flore mésophile aérobie totale, EC= *Escherichia coli*, SAL= *Salmonella* sp, ST= *Staphylococcus aureus*.

**Annexe 9:** Liste des organismes récoltés dans le 1<sup>er</sup> arrondissement de la ville de Moundou

Classes	Ordres	Familles	Genres/ espèces	Mode de vie	P5	P6	P7	P8	P9	P10	
Arachnida	Acari	Hydracariens	nd	Stygoxènes			3			6	
		Parasitidae	nd				1	2	15		
	Arachneides	Argyronete	nd			1		1			
Crustacea	Ostracodes	Cypridae	nd	Stygophyles	842		71	1799	16	27	
	Copépodes	Cyclopidae	nd		13	273	2	2	2		
	Isopodes	Asellidae	<i>Armadillidium</i> sp.	Stygobie			2				
		Stenasellidae	<i>Metastenasellus</i> sp.	Stygobie						2	
Enthognata	Collemboles	Isotomidae	<i>Axelsonia</i> sp.	Stygophyles				3			
	Entomobryomoarphes	Entomobryidae	<i>Lepidocyrtus</i> sp.			1	2	1	2	2	
Insecta	Plécoptères	Perlodidae	<i>Doroneuria baumanni</i>	Stygoxènes				2	2		
	Ephéméroptères	Ephemerellidae	<i>Ephemerella</i> sp.		1	1		9			
									1		
	Tricoptères	Xiphocentronidae	nd							1	
		Hydroptilidae	nd					1			
		Psychomyidae	nd							1	
	Odonates	Aeshnidae	nd		1	4	3				
		Gomphidae	nd		2						
	hémiptères	Mesoveliidae	<i>Mesovelia</i> sp.			1					
		Leptopodidae	nd				1				
		Hebridae	<i>Hebrus</i> sp.							2	
	Coléoptères	Notonectidae	<i>Martarega mexicana</i>		1				3		
		Elmidae	<i>Goenelmis</i> sp.		1						
		Dytiscidae	<i>Hydrotrupes</i> sp.						3		
		Hydrophilidae	<i>Helophorus</i> sp.								1
	Diptères	Hydraenidae	<i>Ochthebius</i> sp.					1	6	1	
		Culicidae	<i>Culex</i> sp.		2	9	26			3	1
		Tipulidae	<i>Yamatotipula</i> sp.					1	5	2	
		Chironomidae	<i>Chironomus</i> sp.		96	32	2	11	2	1	
Anthomyidae		nd		1	2						
Thaumaleidae		<i>Thaumalea</i> sp.	7	8		6	4				
Hyménoptères	Mymaridae	nd			1						
Oligochaeta	Haplotaxides	Tubificidae	<i>Tubifex</i> sp.	151	29	67	6	61	12		
		Naididae	nd	2							
	Lumbriculides	Lumbriculidae	nd	2							
Gateropoda	Basommatophères	Physidae	<i>Physa acuta</i>				2	2			
	Neotaenioglossères	Hydrobiidae	<i>Hydrobia</i> sp.	2			1				
<b>ABONDANCE TOTALE</b>					<b>1123</b>	<b>891</b>	<b>201</b>	<b>1876</b>	<b>115</b>	<b>78</b>	
<b>RICHESSSE SPECIFIQUE</b>					<b>14</b>	<b>11</b>	<b>13</b>	<b>18</b>	<b>15</b>	<b>10</b>	

nd= taxon non-déterminé

**Annexe 10:** Liste des organismes récoltés dans le 2<sup>e</sup> arrondissement de la ville de Moundou

Classes	Ordres	Familles	Genres/ espèces	Mode de vie	P14	P15	P16	P46	P47	P48	P49	P50		
Arachnida	Acari	Hydracariens	nd	Stygoxènes	3	8	6			1		2		
		Parasitidae	nd			2	1		1		1			
	Arachneides	Thomasiidae	nd					1						
	Scorpionides	Scorpionides	<i>Chthonius</i>						1					
Crustacea	Ostracodes	Cypridae	<i>Herpetocypris</i> sp.	Stygoophyles	75	524	1	11	259	15	1	2		
	Copépodes	Cyclopoidae	<i>Mesocyclops</i> sp.		27	89	3				73	276		
	Isopodes	Asellidae	<i>Haplophthalmus</i> sp.	Stygobie								2		
		Stenasellidae	<i>Metastenasellus</i> sp.	Stygobie		1	2					5		
Enthognata	Collemboles	Isotomidae	<i>Axelonia</i> sp.	Stygoophyles					2	2				
		Poduridae	<i>Podura aquatica</i>					1		1		3		
	Entomobryomoarphes	Entomobryidae	<i>Lepidocyrtus</i> sp.			1	2	6		1	6			
		Hypogastridae	<i>Anurida maritima</i>						1					
Insecta	Plécoptère	Perlodidae	<i>Doroneuria baumanni</i>	Stygoxènes				1		2		5		
	Odonates	Hydroptilidae	nd										1	
		Hydrosychidae	nd								3		4	
		Cordullidae	nd						1	1				
	hémiptère	Hebridae	<i>Hebrus</i> sp.											4
		Gerridae	<i>aquarus</i> sp.					1						
		Corixidae	<i>Coricella decolor</i>									1		
	Coléoptère	Elmidae	<i>Limnius</i> sp.								2			
		Dytiscidae	<i>Hydrotrupes</i> sp.			1	2	2	1			1		
		Hydrophilidae	<i>Derallus</i> sp.						1		1			2
	Diptère	Anophelinae	<i>Anopheles</i> sp.					5	11					
		Culicidae	<i>Culex</i> sp.			1					45	13	8	2
		Tipulidae	<i>Yamatotipula</i> sp.			29	2	2	11	112	5	3	3	
		Chironomidae	<i>Chironomus</i> sp.			18		2	36	85	4	73	1	
		Ceratopogonidae	<i>Atrichopogon</i> sp.							3	1			
		Rhagionidae	nd											2
		Syrphidae	nd						1					
		Chaoboridae	<i>Chaoborus americanus</i>							2				
		Sciomyzidae	nd											4
		Psychodidae	<i>Perichoma</i> sp.											8
Hyménoptère		Ichneumonidae	nd									4		
Orthoptère		Gryllidae	<i>Allonemibus fasciatus</i>					1						
Thysanoptère	Thrips	nd			2				1					
Oligochaeta	Haplotaxides	Tubificidae	nd		9		4	1		4	6	11		
		Hirudinae	nd			16								
Gateropoda	Haplotaxides	Physidae	<i>Physa acuta</i>			1								
Myriapoda	Chilopodes	Chilopodae	<i>Cryptops</i> sp.					1						
<b>ABONDANCE TOTALE</b>					<b>344</b>	<b>654</b>	<b>168</b>	<b>68</b>	<b>512</b>	<b>61</b>	<b>167</b>	<b>368</b>		
<b>RICHESSSE SPECIFIQUE</b>					<b>9</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>13</b>	<b>11</b>	<b>15</b>	<b>9</b>	<b>19</b>		

**Annexe 11:** Liste des organismes récoltés dans le 3<sup>e</sup> arrondissement de la ville de Moundou

Classes	Ordres	Familles	Genres/ espèces	Mode de vie	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P30	P31	P32	P40	P41	P42	P43	P44	P45	
Arachnida	Acari	Hydracariens	nd	Stygoxènes				4	2		2				1			5		
		Parasitidae	nd		3	1	1	3					3			1				
		Trombidiidae	nd	Stygobie															1	
	Arachneides	Theriidae	<i>Philonida</i> sp.	Stygobie					4							1	1		1	1
		Dictynidae	nd	Stygophyles									1							
Thomisiidae		nd			2					1										
Ostracodes	Cypridae	nd	486		1697	73	112	217	6	118	137	34	62	4	167	6	16	13		
Crustacea	Copépodes	Cyclopidae	nd		731	68	241	11	168	66	25	45		159	26	4				
	Isopodes	Asellidae	<i>Haplophthalmus</i> sp.						1									2		
		Stenasellidae	<i>Metastenasellus</i> sp.		2	7		2						1	4	15			1	
	Enthognata	Collemboles	Isotomidae	<i>Axelsonia</i> sp.	Stygoxènes			5							1	5	1	1	2	
Sminthuridae			<i>Sminthurinus</i> sp.								1		1							
Poduridae			<i>Podura aquatica</i>																	1
Entomobryomoarphes		Entomobryidae	<i>Lepidocyrtus</i> sp.			2	5	4	2	2	2		2	1		4		15		
		Hypogastridae	<i>Anurida maritima</i>			6	3													1
Insecta	Plécoptères	Perlodidae	<i>Doroneuria baumanni</i>							2			1				1			
	Ephéméroptères	Ephemerellidae	<i>Ephemerella</i> sp.														1			
	Tricoptères	Hydrosychidae	nd									1								
	Odonates	Aeshnidae	nd							3										
		Gomphidae	nd							2							1			
	Hémiptères	Hebridae	<i>Hebrus</i> sp.										1							
		Notonectidae	<i>Martarega mexicana</i>		1	7					3	7	1				2			
		Corixidae	<i>Coricella decolor</i>		4															
		Macovellidae	<i>Macovelia</i> sp.															1		
Coléoptères	Elmidae	<i>Herterlimnius</i> sp.							1					1			1			

		Dytiscidae	<i>Hydrotrupes</i> sp.	Stygoxènes	2	2	3	2	1	6	2	4	1	1			3	2	3	
		Hydrophilidae	<i>Helophorus</i> sp.		3											2				
		Hydraenidae	<i>Hydraena</i> sp.											1		1				
		Staphylinidae	<i>Bledius</i> sp.							1										
		Chrysomelidae	<i>Donacia</i> sp.																	1
	Diptère	Anophelinae	<i>Anopheles</i> sp.																	12
		Culicidae	<i>Culex</i> sp.		1	2		9	7	1			1	156	1	1	1	1	43	19
		Tipulidae	<i>Yamatotipula</i> sp.			5		2		1			28	59				5	166	18
		Chironomidae	<i>Chironomus</i> sp.		3	4		7	1	5	4	24	21	77	9	33	6	6	83	
		Ceratopogonidae	<i>Atrichopogon</i> sp.			3										1				
		Rhagionidae	nd		2	2	1			2	1									
		Dixidae	<i>Dixa</i> sp.		2	3			1						1					
		Chaoboridae	<i>Chaoborus americanus</i>			1														
		Sciomyzidae	nd										1	2						
		Athericidae	<i>Atherix</i> sp.												1					
		Simulidae	nd								2									
		Homoptères	Aphidae		nd						1					1				
Hyménoptères	Agriotypidae	nd		2																
Oligochaeta	Haplotaxides	Tubificidae	nd	6	5	3	36	24	8	6		1	22	15	5			11		
		Naididae	nd			2								1						
	Arhynchobdellides	Hirudinae	nd									2								
Gateropoda	Basommatophères	Physidae	<i>Physa acuta</i>								2				1	3				
	Littorinimorphes	Assimineidae	<i>Assimenea ovata</i>												2	1	1			
	Neotaenioglossères	Hydrobiidae	<i>Hydrobia</i> sp.												1					
	Caenogastropodes	Planorbinae	<i>Bilinus globolus</i>		1															
	Pauropodes	Pauropodae	<i>Pauropus</i> sp.													1				
	Pauropodes	Diplopodae	<i>Polydesmus</i> sp.														1			
Chilopodes	Chilopodae	<i>Cryptops</i> sp.														1				
<b>ABONDANCE TOTALE</b>					<b>515</b>	<b>2483</b>	<b>162</b>	<b>424</b>	<b>270</b>	<b>266</b>	<b>1202</b>	<b>227</b>	<b>328</b>	<b>168</b>	<b>206</b>	<b>267</b>	<b>237</b>	<b>104</b>	<b>114</b>	
<b>RICHESSSE SPECIFIQUE</b>					<b>12</b>	<b>19</b>	<b>9</b>	<b>12</b>	<b>10</b>	<b>16</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>13</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>17</b>	<b>13</b>	<b>17</b>	<b>8</b>	

**Annexe 12:** Liste des organismes récoltés dans le 4e arrondissement de la ville de Moundou

Classes	Ordres	Familles	Genres/ espèces	Mode de vie	P1	P2	P3	P4	P11	P12	P13	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P33	P34	P35	P36	P37	P38	P39		
Arachnida	Acari	Macrochelidae	nd	Stygoxènes	1																						
		Hydracariens	nd							17	3	2	2			2				4					2	1	
		Parasitidae	nd		4		1		4		2	3	5				1								1		1
		Trombidiidae	nd						3																		
		Lycosidae	nd																		1						
	Arachneides	Theriidae	<i>Philonida</i> sp.								1																2
		Argiopidae	nd																							1	
		Dictynidae	nd									4	1	2													
		Argyronete	nd						3				4				1									1	
		Thomisiidae	nd						1													1					
Crustacea	Ostracodes	Cypridae	nd	Stygobie	600	4	2425	129	233	554	102	73	41	3369	1027	417	717	41	319	136	220	319	29	7	4157		
	Copépodes	Cyclopidae	nd				2	30	9	86	5	839	990	17	333	39	54	246	21	11	6	44	20	17	140	80	
	Isopodes	Asellidae	<i>Haplophthalmus</i> sp.																	2		1			1		
		Stenasellidae	<i>Metastenasellus</i> sp.					1	4	1				1								2		1	2	2	6
Enthognata	Collemboles	Isotomidae	<i>Isotomurus tricolor</i>	Stygoptyles	1	12	1		1	3	3	2		3										22	7		
		Sminthuridae	<i>Sminthurinus</i> sp.													1								1			
		Poduridae	<i>Podura aquatica</i>					4	1																		
	Entomobryomorphes	Entomobryidae	<i>Lepidocyrtus</i> sp.			1		1				5	4	8	1	3	1	2				2	2	3	1	4	
Insecta	Pléocoptères	Perlodidae	<i>Doroneuria baumanni</i>	Stygoxènes	1	3	1	6	1																1		
		Leutridae	<i>Leutra</i> sp.														1										
	Ephéméroptères	Ephemerellidae	<i>Ephemerella</i> sp.														2										
		Tricoptères	Polycentropidae		nd		1										1										
	Rossianidae		nd						31																		
	Odonates	Aeshnidae	nd									1										1				1	
		Gomphidae	nd			2	1											1		1							
		Libellulidae	nd																					2			
	hémiptères	Mesoveliidae	<i>Mesovelia</i> sp.						2															1			
		Hebridae	<i>Hebrus</i> sp.																							1	
		Notonectidae	<i>Martarega mexicana</i>			4		2		1			3						13		1						
		Gerridae	<i>aquarus</i> sp.															1									
		Naucoridae	nd																							1	
	Coléoptères	Elmidae	<i>Goenelmis</i> sp.						2				1		1									1			
		Dytiscidae	<i>Leodessus</i> sp.			12	3			6	2								6	1		3	6	1	2	1	
		Hydrophilidae	<i>Helophorus</i> sp.								1			1										2			
Hydraenidae		<i>Hydraena</i> sp.		10	3			8				1	1												2		
Salpingidae		<i>Aegialites</i> sp.										1															

		Sphercheidae	Dasycerus sp.	Stygoxènes						1											3					
		Staphylinidae	Bledius sp.									4		1	1											
		Hydroscaphidae														1										
		Chrysomelidae	Donacia sp.																2							
	Diptères	Anophelinae	Anopheles sp.					17							4		2					3				
		Culicidae	Culex sp			180	1	2	5	1		1	6	3	1	7	2	4	25	38	3	1	7	1	27	5
		Tipulidae	Deinocerites sp.			11		3			2		25	2				2			7		1	18	2	
		Chironomidae	Chironomus sp.			16	3	6	23	179	2	33	16	6	2	12	15	12	37	6	1	4	29	6	17	74
		Ceratopogonidae	Yamatotipula sp.			4						1	1	3		1							5			
		Rhagionidae	Chironomus sp.			17		17				1														
		Ephydriae	nd			4																				
		Dixidae	Dixa sp.			1															1					
		Anthomyidae	nd											1												
		Chaoboridae	Chaoborus americanus																						2	
		Thaumaleidae	Thaumalea sp.						2					1												
		Sciomyzidae	nd																				9			
		Psychodidae	Perichoma sp.			16																1	1			
		Stratiomyidae	nd																						2	
	Limoniidae	nd						20																		
	Simuliidae	nd				1	5								1		1									
homoptères	Aphidae	nd																				44	1			
Hyménoptères	Agriotypidae	nd		1										1		2				1	1					
	Ichneumoridae	nd																			2	2				
Lepidoptères	Crambidae	nd						1																		
	Eoparargractis	nd																				1				
Thysanoptères	Thrips	nd												1												
Myriapoda	Symphiles	Symphilae	Scolopendrella sp.										1													
	Diplopodes	Diplopodae	Polydesmus sp.	1										2		1										
	Chilopodes	Chilopodae	Cryptops sp.								1										1					
Oligochaeta	Haplotaxides	Tubificidae	nd	16	17	37	49	7	4	11	3	9	1		10	158	1	14	3	1	25	1	3			
		Naididae	nd								5												1			
Gateropoda	Basommatophères	Physidae	Physa acuta				1														1					
	Littorinimorphes	Assimineidae	Assimenea ovata													1										
	Neotaenioglossères	Hydrobiidae	Hydrobia sp						1					2												
	Littorinimorphes	Bithyniidae	Jubaia aethiopica											3	2											
	Caenogastropodes	Planorbinae	Bilinus tropicus									1	1													
	Squamates	Viparidae	Bellamya unicolor						1																	
<b>ABONDANCE TOTALE</b>				<b>904</b>	<b>51</b>	<b>2532</b>	<b>302</b>	<b>537</b>	<b>593</b>	<b>1008</b>	<b>1142</b>	<b>108</b>	<b>3712</b>	<b>1103</b>	<b>518</b>	<b>1160</b>	<b>134</b>	<b>396</b>	<b>168</b>	<b>279</b>	<b>432</b>	<b>88</b>	<b>274</b>	<b>4348</b>		
<b>RICHESSSE SPECIFIQUE</b>				<b>22</b>	<b>12</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>16</b>	<b>12</b>	<b>15</b>	<b>19</b>	<b>18</b>	<b>9</b>	<b>15</b>	<b>18</b>	<b>9</b>	<b>12</b>	<b>9</b>	<b>14</b>	<b>8</b>	<b>20</b>	<b>15</b>	<b>19</b>	<b>16</b>		

**Annexe 13:** Valeurs des coefficients de corrélation de Pearson (n) entre les variables morphohydrologiques et la faune souterraine et entre faune dans les eaux de puits de la ville de Moundou pendant la période d'étude

Variables	Alt	NP	CE	Prof	Dtre	Hmarg	Dlat	Theri	Cypri	Asell	Stenas	Perlo	Rossia	Gomph	Mesove	Dytis	Spher	Staphy	Culici	Chiro	Dixi	Limo	Diplo	Chilo
Theri	-0,061	<b>0,333</b>	0,035	0,238	<b>0,343</b>	0,107	-0,024	<b>1</b>																
Cypri	<b>-0,297</b>	0,007	0,072	0,050	-0,007	-0,084	-0,096	0,162	<b>1</b>															
Asell	0,277	-0,096	-0,170	-0,169	-0,107	-0,079	<b>0,332</b>	-0,022	-0,187	<b>1</b>														
Stenas	0,073	0,082	<b>0,367</b>	<b>0,284</b>	0,073	-0,050	<b>-0,280</b>	0,226	0,135	0,005	<b>1</b>													
Perlo	0,140	<b>-0,296</b>	0,011	-0,185	0,023	-0,095	0,025	-0,130	-0,103	0,158	0,121	<b>1</b>												
Rossia	0,138	-0,182	0,005	-0,115	<b>0,282</b>	-0,031	0,052	-0,047	-0,056	-0,055	0,155	<b>0,627</b>	<b>1</b>											
Gomph	0,089	-0,006	-0,027	-0,021	<b>-0,420</b>	-0,078	0,225	-0,067	-0,042	0,118	0,053	0,098	-0,054	<b>1</b>										
Mesove	0,124	-0,086	0,176	0,055	<b>0,305</b>	-0,048	-0,050	-0,078	-0,088	-0,091	0,094	<b>0,465</b>	<b>0,814</b>	-0,090	<b>1</b>									
Dytis	0,040	-0,006	-0,064	-0,044	<b>-0,335</b>	0,224	0,233	-0,042	-0,080	-0,019	-0,175	0,020	-0,104	<b>0,387</b>	-0,146	<b>1</b>								
Spher	-0,043	-0,162	0,001	-0,105	0,069	-0,037	-0,024	-0,060	-0,064	0,167	0,019	-0,085	-0,026	-0,069	-0,043	0,027	<b>1</b>							
Staphy	<b>-0,286</b>	0,069	-0,054	0,011	-0,022	-0,044	0,005	-0,076	-0,060	-0,031	-0,061	-0,056	-0,033	0,101	-0,055	-0,082	-0,042	<b>1</b>						
Culici	0,160	<b>-0,280</b>	-0,130	-0,264	-0,069	-0,082	0,016	-0,083	-0,086	0,033	-0,135	0,084	-0,038	<b>0,289</b>	-0,053	<b>0,390</b>	-0,071	-0,075	<b>1</b>					
Chiro	-0,057	0,196	<b>0,362</b>	<b>0,356</b>	0,141	0,086	-0,012	0,083	-0,036	-0,110	-0,028	-0,101	-0,017	0,023	<b>0,302</b>	-0,040	-0,085	-0,096	-0,029	<b>1</b>				
Dixi	0,024	0,110	-0,085	0,018	-0,038	-0,067	<b>-0,283</b>	0,108	0,127	-0,061	0,238	-0,123	-0,046	0,014	-0,077	0,190	-0,059	-0,076	0,080	-0,105	<b>1</b>			
Limo	0,138	-0,182	0,005	-0,115	<b>0,282</b>	-0,031	0,052	-0,047	-0,056	-0,055	0,155	<b>0,627</b>	<b>1,000</b>	-0,054	<b>0,814</b>	-0,104	-0,026	-0,033	-0,038	-0,017	-0,046	<b>1</b>		
Diplo	0,031	0,072	-0,038	0,023	-0,200	-0,052	<b>0,295</b>	-0,008	-0,034	0,087	-0,135	-0,085	-0,040	<b>0,314</b>	-0,066	0,138	-0,050	0,120	<b>0,284</b>	-0,095	0,010	-0,040	<b>1</b>	
Chilo	0,062	0,085	-0,027	0,039	0,127	-0,055	0,077	0,013	-0,123	0,143	-0,114	-0,079	-0,042	-0,111	0,149	-0,085	-0,054	-0,069	-0,052	-0,042	-0,096	-0,042	0,123	<b>1</b>

Les valeurs des corrélations significatives  $p < 0,05$

Alt= altitude, CE= Épaisseur de la colonne d'eau, Dtre = diamètres des puits, Dlat= distance du puits avec la latrine, HMarg= hauteur de la margelle, NP= niveau piézométrique, Prof= Profondeur du puits. Asell= Asellidae, Chilo= Chilopodae, Chiro= Chironomidae, Culi= Culicidae, Cypri= Cypridae, Diplo= Diplopodae, Dixi= Dixidae, Dytis= Dytiscidae, Gomph= Gomphidae, Limo= Limonidae, Meso= Mesovellidae, Perlo= Perlodidae, Rossia= Rossianidae, Stap= Staphylinidae, Stenas= Stenasellidae, Spher= Sphercheidae, Theri= Theriidae.

**Annexe 14:** Valeurs des coefficients de corrélation de Pearson (**n**) entre les variables physicochimiques et la faune souterraine dans les eaux de puits de la ville de Moundou pendant la période d'étude.

Variables	T°C	pH	TAC	MES	Turb	Coul	Cond	TDS	TH	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	DBO <sub>5</sub>	DCO	MO	NO <sub>2</sub> -	NO <sub>3</sub> -	NH <sub>4</sub> +	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> -	Fe	F
Theri	-0,050	-0,186	-0,086	-0,100	-0,075	-0,094	-0,103	-0,073	0,007	-0,044	0,137	<b>-0,308</b>	-0,172	-0,019	0,107	0,075	0,087	0,030	-0,106	-0,148	-0,028
Thomi	0,022	0,011	-0,070	0,000	<b>0,429</b>	0,217	-0,053	-0,051	-0,110	0,022	0,064	-0,105	0,026	0,048	0,144	-0,071	-0,115	-0,082	-0,025	<b>0,297</b>	-0,088
Cypri	-0,022	<b>0,297</b>	-0,091	-0,041	0,157	0,103	-0,192	-0,195	-0,220	-0,196	-0,172	-0,130	0,048	0,194	-0,047	-0,116	-0,129	-0,120	-0,151	0,084	-0,140
Asell	-0,019	-0,090	-0,058	-0,078	-0,015	-0,057	0,073	0,074	-0,021	-0,074	0,104	-0,105	-0,169	-0,079	<b>0,380</b>	<b>0,281</b>	-0,045	0,216	-0,011	0,050	0,075
Stenas	0,109	0,027	-0,011	-0,039	0,023	-0,051	-0,042	-0,047	0,195	-0,156	0,238	-0,187	0,047	0,198	-0,021	-0,112	<b>0,308</b>	0,010	0,250	0,014	0,187
Isoto	-0,237	0,153	<b>0,370</b>	-0,079	-0,075	-0,075	-0,056	-0,060	0,172	-0,074	-0,115	0,078	-0,220	-0,172	-0,072	-0,024	0,068	0,039	-0,024	0,193	0,141
Sminth	-0,275	0,146	-0,076	0,167	0,019	-0,066	-0,050	-0,054	-0,007	0,086	0,173	0,073	0,094	-0,076	0,198	-0,070	<b>0,338</b>	<b>0,379</b>	-0,068	0,064	-0,105
Podur	<b>0,328</b>	0,040	-0,080	-0,143	-0,043	-0,069	0,127	0,124	0,058	-0,071	0,193	-0,015	-0,091	-0,058	0,014	-0,068	-0,157	0,048	0,142	-0,156	0,141
Enthom	0,040	-0,229	-0,124	-0,065	-0,069	-0,002	0,182	0,184	0,181	-0,009	-0,013	<b>-0,338</b>	-0,049	0,068	<b>0,357</b>	<b>0,438</b>	-0,001	-0,035	0,177	-0,078	0,188
Epheme	0,072	0,043	0,047	-0,048	-0,063	-0,059	-0,131	-0,131	-0,180	<b>0,285</b>	<b>-0,290</b>	0,112	0,014	-0,038	-0,094	-0,054	-0,145	0,000	-0,169	-0,067	-0,073
Hydros	0,186	0,107	-0,026	-0,164	-0,154	-0,146	0,227	0,224	0,189	-0,157	<b>0,436</b>	-0,076	0,041	0,132	0,004	-0,049	-0,151	<b>0,309</b>	<b>0,465</b>	-0,163	<b>0,334</b>
Aesh	-0,214	-0,091	-0,038	-0,084	0,071	0,033	-0,213	-0,213	-0,257	-0,162	0,044	<b>0,287</b>	-0,123	-0,226	-0,060	-0,082	-0,195	-0,110	-0,238	0,096	-0,224
Mesove	-0,246	0,138	-0,019	0,128	0,166	0,054	-0,046	-0,045	-0,137	0,114	-0,202	<b>0,341</b>	0,019	-0,149	0,120	-0,055	0,048	-0,146	-0,115	0,127	-0,204
Corixi	0,067	0,028	-0,023	-0,066	-0,034	-0,052	-0,012	-0,013	-0,034	0,106	0,104	0,059	0,073	0,060	-0,050	0,116	<b>0,289</b>	-0,077	0,014	-0,065	0,068
Hydrophi	0,210	0,127	-0,047	-0,005	-0,077	-0,164	0,258	0,248	0,238	-0,019	0,228	0,159	0,132	-0,016	0,099	-0,108	<b>0,361</b>	0,244	<b>0,312</b>	-0,089	<b>0,319</b>
Hydrae	-0,004	-0,229	0,212	0,063	-0,053	-0,025	-0,126	-0,126	-0,268	-0,124	<b>-0,357</b>	<b>0,344</b>	0,238	-0,030	-0,017	-0,081	-0,075	-0,023	<b>-0,284</b>	-0,183	-0,119
Spher	0,007	-0,018	0,040	-0,102	-0,117	-0,090	<b>0,450</b>	<b>0,458</b>	<b>0,418</b>	-0,218	0,089	-0,076	-0,143	-0,108	0,021	-0,034	0,015	0,210	0,181	0,018	<b>0,284</b>
Anoph	-0,163	0,072	-0,059	-0,007	0,051	-0,023	-0,011	-0,009	-0,095	<b>0,343</b>	<b>-0,280</b>	0,007	-0,114	-0,069	<b>0,307</b>	<b>0,316</b>	0,006	-0,075	-0,129	0,027	0,005
Culici	-0,208	-0,238	0,110	<b>0,467</b>	0,082	0,250	-0,106	-0,103	-0,094	-0,107	-0,144	0,048	0,260	<b>0,285</b>	0,089	0,048	0,056	0,046	-0,042	0,017	-0,147
Tipul	0,021	-0,234	-0,014	0,267	0,087	0,105	0,125	0,125	<b>0,305</b>	<b>0,296</b>	-0,108	<b>-0,321</b>	0,180	<b>0,405</b>	-0,010	0,134	0,010	0,207	0,176	0,130	-0,056
Rhagio	-0,211	0,238	0,088	0,003	<b>0,433</b>	<b>0,334</b>	-0,165	-0,165	-0,256	-0,145	-0,224	0,229	0,007	-0,109	0,222	-0,051	-0,032	-0,063	-0,161	0,087	-0,224
Chaobo	0,032	-0,002	-0,019	-0,038	-0,040	-0,064	-0,075	-0,075	<b>0,318</b>	0,205	0,032	-0,127	-0,054	0,062	-0,090	0,123	0,011	0,110	0,199	0,164	<b>0,304</b>
Thaum	0,042	-0,002	-0,010	-0,065	0,105	0,043	-0,219	-0,217	<b>-0,312</b>	0,030	<b>-0,295</b>	<b>0,403</b>	-0,007	-0,180	-0,127	-0,078	-0,198	-0,110	-0,276	0,007	-0,203

Sciom	-0,151	0,070	-0,044	<b>0,344</b>	0,088	0,030	0,202	0,201	0,160	-0,061	0,078	0,172	<b>0,362</b>	0,169	<b>0,415</b>	-0,043	0,278	0,171	0,171	0,150	-0,022
Simul	-0,164	<b>0,428</b>	0,072	0,072	<b>0,532</b>	<b>0,433</b>	-0,172	-0,174	-0,246	-0,056	-0,171	0,050	-0,114	-0,118	0,132	-0,059	-0,043	-0,199	-0,155	0,229	<b>-0,330</b>
Agrio	<b>-0,385</b>	-0,022	0,024	-0,031	0,009	-0,074	0,076	0,082	0,098	-0,250	0,072	0,079	<b>0,338</b>	0,226	0,100	-0,073	0,241	-0,017	-0,042	0,032	0,033
Ichneu	0,078	0,229	0,002	-0,229	-0,165	-0,143	0,246	0,245	<b>0,331</b>	-0,213	<b>0,280</b>	0,020	-0,136	-0,061	0,042	-0,046	-0,105	0,275	0,270	0,033	<b>0,402</b>
Tubif	0,022	0,087	-0,013	-0,076	0,218	0,159	-0,207	-0,204	-0,278	-0,219	-0,119	<b>0,405</b>	-0,061	-0,237	-0,080	-0,097	-0,149	-0,177	-0,251	0,077	-0,262
Chilo	0,055	-0,168	-0,071	0,019	0,086	-0,056	<b>0,347</b>	<b>0,348</b>	0,233	0,156	-0,109	-0,099	0,016	-0,043	<b>0,515</b>	<b>0,320</b>	0,248	0,104	0,146	0,042	0,050

Les valeurs des corrélations significatives  $p < 0,05$

Cond= Conductivité électrique, Coul= Couleur, DBO<sub>5</sub>= Demande biologique en oxygène pendant 5 jours, Fe= fer, F= Fluor, MO= Matière organique, MES= Matière en Suspension, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>= Ammonium, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>= Nitrate, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>: Nitrites, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>= Sulfates, T°C= Température, TDS= Solides totaux dissous, TH= Dureté totale, Turb= Turbidité, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>= Phosphates. Aesh= Aeshnidae, Agrio= Agriotypidae, Anoph= Anophelinae, Asell= Asellidae, Chaobo= Chaoboridae, Chilo= Chilopodae, Chiro= Chironomidae, Culici= Culicidae, Corixi= Corixidae, Cypri= Cypridae, Enthom= Entomobryidae, Epheme= Ephemereidae, Hydrae= Hydraenidae, Hydrophi= Hydrophilidae, Hydros= Hydrosychidae, Isoto= Isotomidae, Ichneu= Ichneumonidae, Mesove= Mesovellidae, Podur= Poduridae, Rhagio= Rhagionidae, Sciom= Sciomyzidae, Simul= Simulidae, Smint= Sminthuridae, Stenas= Stenasellidae, Spher= Sphercheidae, Thaum= Thaumaleidae, Theri= Theriidae, Thomi= Thomisiidae, Tubif= Tubificidae, Tipul= Tipulidae.

**Annexe 15 :** Valeurs des coefficients de corrélation de Pearson (**n**) entre les variables bactériologiques et l'abondance de la Coliformes fécaux.

Variables	FMT	CT	CF	EC	ST	SAL
Paras	0,030	0,064	0,190	0,005	<b>0,301</b>	0,062
Theri	0,067	0,153	0,079	0,031	0,123	<b>0,384</b>
Entho	0,261	<b>0,466</b>	<b>0,371</b>	0,233	0,259	0,022
Hypo	<b>0,351</b>	<b>0,407</b>	0,252	0,196	<b>0,400</b>	-0,103
Dytis	<b>0,294</b>	0,253	<b>0,321</b>	<b>0,288</b>	0,141	0,053
Dixi	0,118	<b>0,358</b>	0,243	0,111	<b>0,287</b>	0,194
Antho	-0,064	-0,129	-0,087	0,069	-0,168	<b>0,330</b>

Les valeurs des corrélations significatives  $p < 0,05$

CT= Coliformes totaux, FMT= Flore mésophile aérobie totale, EC= *Escherichia coli*, SAL= *Salmonella* sp, ST= *Staphylococcus aureus*. Dixi= Anthomyidae, Dixidae, Dytis= Dytiscidae, Enthom= Entomobryidae, Hypo= Hypogastridae, Paras= Parasitidae, Theri= Theriidae.

**Annexe 16:** Quelques invertébrés recoltés dans les eaux des puits au cours de l'étude.

**Hydracarina (x40)**



**Diptères**



Culiciidae (x40)  
(*Culex* sp.)



Culiciidae (x40)  
(*Deinocerites* sp.)



Chironomidae (x40)  
*Atrichopogon* sp.



Chironomidae (x40)  
(*Chironomus* sp.)



Tipulidae (x40)  
(*Yamatotipula* sp.)



Syrphidae (x40)



Dixidae (x40)  
(*Dixa* sp.)



Rhagionidae (x40)



Psychodidae (x40)



Anophelinae (x40)  
(*Anopheles* sp.)

**Homoptère et Ephéméroptères**



Aphidae (x40)



Perlodidae (x40)  
(*Doroneuria baumanni*)



Ephemerellidae (x40)  
(*Ephemerella* sp.)

## Coléoptères



Elmidae (x40)  
(*Goenelmis* sp.)



Elmidae (x40)  
(*Optiservus* sp.)



Elmidae (x40)  
*Limnebius* sp.



Dytiscidae (x40)  
(*Platambus* sp.)



Dytiscidae (x40)  
(*Leodessus*) sp.



Dytiscidae (x40)  
(*Hydrovatus* sp.)



Dytiscidae (x40)  
(*Hydrotrupes* sp.)



Dytiscidae (x40)  
(*Hyphydrus* sp.)



Hydraenidae (x40)  
(*Esolus* sp.)



Hydraenidae (x40)  
(*Hydraena* sp.)



Hydraenidae (x40)  
(*Ochthebius* sp.)



Staphylinidae (x40)  
(*Bledius* sp.)



Chrysomelidae (x40)  
(*Donacia* sp.)



Hydrophilidae (x40)  
(*Helophorus* sp.)

## Odonates et Hémiptères



Gerridae (x40)  
(*Aquarus* sp.)



Hebridae (x40)  
(*Hebrus* sp.)



Mesoveliidae (x40)  
(*Mesovelgia* sp.)



Notonectidae (x40)  
(*Martarega mexicana*)



Corixidae (x40)  
(*Coricella decolor*)

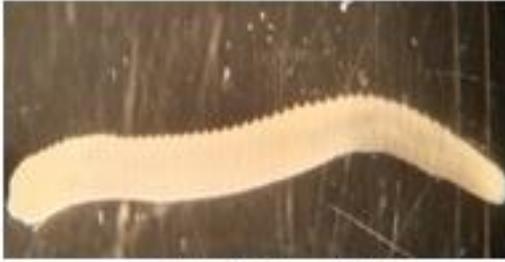


Odonates (x40)  
Gomphidae



Odonates (x40)  
Aeshnidae

## Oligochètes



Tubificidae (x40)



Naididae (x40)



Lumbriculidae (x40)

## Gatépodes



Assimineidae (x40)  
*(Assimenea ovata)*



Bithyniidae (x40)  
*(Gabiella sp.)*



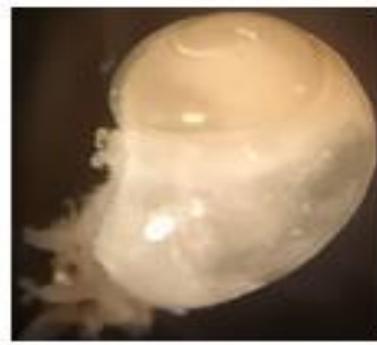
Hydrobiidae (x40)  
*(Hydrobia sp.)*



Planorbinae (x40)  
*(Bilinus tropicus)*



Physidae (x40)  
*(Physa acuta)*



Planorbinae (x40)  
*(Bilinus globolus)*

## Myriapodes



Diplopoda (x40)  
*(Polydesmus sp.)*



Chilopoda (x40)  
*(Cryptops sp.)*



**PUBLICATION ISSUE  
DE LA THÈSE**