

CARACTÉRISATION HYDROCHIMIQUE SAISONNIÈRE (ÉTIAGE ET CRUE) ET VULNÉRABILITÉ ENVIRONNEMENTALE DE LA RESSOURCE EN EAU DE LA RETENUE DE MOKOLO (EXTRÊME-NORD CAMEROUN).

Lewa Sara

Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences, Université de
Maroua, Cameroun

Ombolo Auguste

Laboratoire d'Hydraulique, Institut Supérieur du Sahel, Université de
Maroua, Cameroun

Loura Benguella Benoit

Département de Génie Textile et Cuir, Institut Supérieur du Sahel, Université
de Maroua, Cameroun

Abstract

The contribution of this work is a hydrochemical characterization and study of the environmental vulnerability of the water resources of the water retention of Mokolo in the Far North of Cameroon, built in 1979 by damming the upstream part of the Mayo-Tsanaga, and which is used to supply drinking water for a population of about 800,000 inhabitants. Extreme anthropogenic pressures during the period of low water make vulnerable resource towards the pollution while the wet season rainfall result in significant changes in the mineralization of the water due to leaching from agricultural land in the watershed. The analysis of the results shows a variation during low water and flood water of the hydrochemical facies considering a diverse origin of acquisition of the mineralization factors. In addition, high concentrations of certain ions during flood highlight the extent of human agricultural activities on physicochemical quality of water resources.

Keywords: Water retention, Far-North Cameroon, physico-chemical parameters, hydrochemical facies, anthropogenic vulnerability, low water, flood

Résumé

L'apport de ce travail est une caractérisation hydrochimique et une étude de la vulnérabilité environnementale de la ressource en eau de la retenue de Mokolo dans l'Extrême-nord camerounais, construite en 1979 par le barrage de la partie amont du Mayo-Tsanaga, et qui est utilisé pour l'alimentation en eau potable d'une population d'environ 800 000 habitants. Les tensions anthropiques extrêmes pendant la période d'étiage rendent la ressource vulnérable vis-à-vis de la pollution tandis que les précipitations de la saison humide entraînent des modifications importantes de la minéralisation des eaux suite au lessivage des terrains agricoles du bassin versant. L'analyse des résultats obtenus met en évidence une variation en période d'étiage et de crue du faciès hydrochimique des eaux compte tenu d'une origine diverse des facteurs d'acquisition de la minéralisation. Par ailleurs, les fortes concentrations de certains ions en période de crue mettent en évidence l'ampleur de l'action anthropique agricole sur la qualité physicochimique de la ressource en eau.

Mots clés: Retenue, Extrême-nord camerounais, paramètres physico-chimiques, faciès hydrochimique, vulnérabilité anthropique, étiage, crue.

1. Introduction

L'eau, ressource renouvelable, n'est pas illimitée ; le fait que de nombreuses institutions s'investissent dans sa gestion et sa protection depuis le début des années 80 le démontre. Cependant, comme souligné au cours de la Conférence internationale Eau et Développement durable de Paris du 19 au 21 mars 1998, la situation ne s'améliore pas.

L'explosion démographique, que connaissent certaines villes du monde et en particulier la plupart des villes africaines depuis ces dernières décennies, a poussé les dirigeants de ces pays à construire des barrages de retenue en eau pour subvenir aux besoins en eau sans cesse croissante de ces villes (Rémini et al., 2009).

Par ailleurs, l'apport accru en sels nutritifs dans un lac ou réservoir peut provoquer un accroissement excessif d'algues ou de plantes aquatiques supérieures. Cet accroissement pourra être suivi d'une accumulation de biomasse végétale et de détritiques qui conduisent généralement à une dégradation de la qualité de l'eau et nuisent à son utilisation à des fins multiples (Ryding et Rast, 1994).

Le barrage de retenue de Douvar à Mokolo, situé dans la Région de l'Extrême-Nord camerounais, constitue une réserve en eau douce exploitée par la Camerounaise des Eaux (CDE) pour l'alimentation en eau potable de cette ville et des environs. Les travaux de sa construction débutés en 1978

furent achevés en 1979. Dès lors depuis sa mise en service en 1979, il n'a pas été sujet à plusieurs études afin de comprendre sa dynamique environnementale et la vulnérabilité de sa ressource en eau face à l'action anthropique sans cesse croissante. Des campagnes de terrains menées au cours des années 2011, 2012 et 2013 ont permis de constater la recrudescence des activités anthropiques (les baignades, les lessives, les vaisselles et des activités agropastorales) à ses bordures.

Devant ces multiples menaces qui concourent à raréfier les ressources en eaux exploitables (sécheresse et changements climatiques) et à détériorer celles existantes (pollution anthropique), cette étude va dans le sens de la compréhension des processus physicochimiques ayant lieu au sein des ressources en eaux, leurs évolutions et les mesures de protection intégrée de ces ressources.

L'objectif du présent article est l'étude du comportement hydrochimique en période d'étiage et de crue où la ressource en eau subit des tensions extrêmes d'ordre compositionnel, environnemental et anthropique.

2. Matériels et méthode

2.1. Présentation du site

Le barrage réservoir de Mokolo (Fig. 1) est situé à environ 815 m d'altitude entre les coordonnées géographiques 10°46'N et 13°47'E. Il est issu de la fermeture du défilé de Douvar qui constitue la partie amont du bassin versant du Mayo-Tsanaga. Le substratum rocheux sur lequel repose le barrage est de nature migmatitique avec à ses bordures deux massifs rocheux granitiques à l'origine dudit défilé (Olivry et al., 1974).

Le climat est type sahélien avec 7 mois de sécheresse et 5 mois de pluie. Les précipitations moyennes annuelles atteignent 1000 mm, la température moyenne annuelle est de 26,0°C et l'humidité de l'air au sol est de 48%. L'évapotranspiration (ETP) annuelle est d'environ 2000 mm avec un minimum mensuel de 85 mm en juillet et un maximum de 235 mm en mars (Olivry et al., 1986).

La superficie du bassin versant hydrologique (Fig. 2) est d'environ 49 km² et la capacité maximale du réservoir est estimée à 3 millions de m³ en période de crue avec une surface libre du plan d'eau d'environ 3,8 km². Le réservoir a pour rôle principal celui d'alimenter en eau potable les localités de Mokolo, Koza et Mora avec une population globale d'environ 800 000 habitants.

Les activités anthropiques directes autour de la ressource en eau sont principalement d'ordre agropastoral et plus particulièrement maraîchères. Néanmoins, le bassin versant de la retenue connaît en période de saison pluvieuse (avril à septembre) une intense activité agricole et érosive.

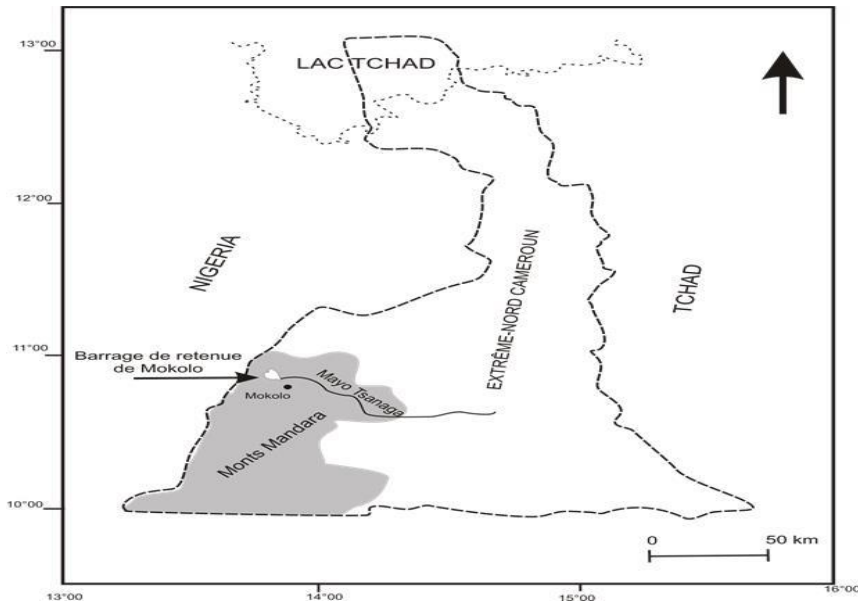


Fig. 1: Localisation de la retenue d'eau de Mokolo (Extrême-Nord Cameroun)

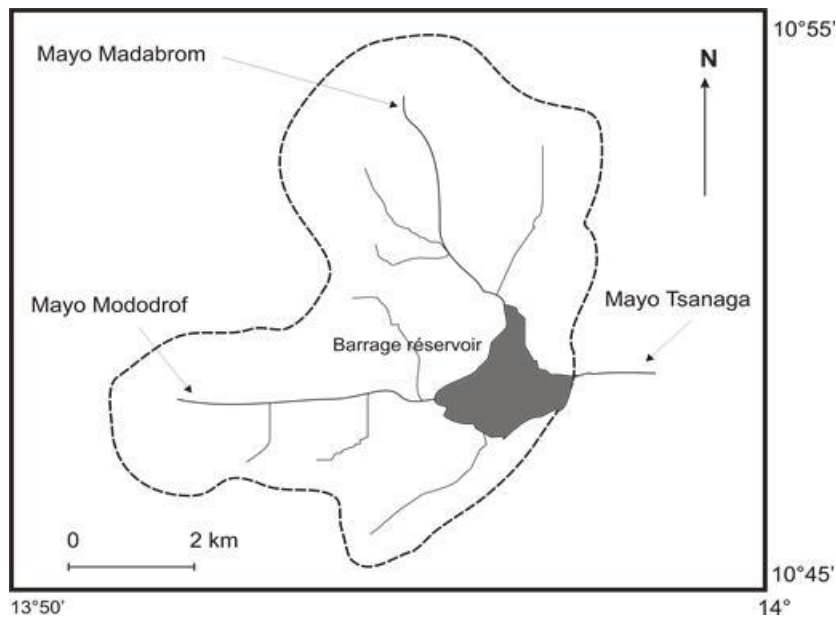


Fig.2 : Bassin versant hydrologique de la retenue de Mokolo

2.2. Echantillonnage et prélèvement

L'échantillonnage s'est effectué sur la surface libre du plan d'eau (Fig. 3) et les points cibles sont choisis de manière à couvrir toute surface de de la retenue, ceci de la périphérie vers le centre et à des intervalles de 1 m de hauteur pour constituer un échantillon moyen. La période d'échantillonnage choisie est la période d'étiage ou de basses eaux

correspondant au mois de mars-avril et la période de crue ou hautes eaux entre juillet et août.

La campagne de prélèvement s’est déroulée au cours de l’année 2013 et les prélèvements d’eau sont effectués en période d’étiage et de crue à raison de quinze (15) échantillons par période, soit trente (30) échantillons au total. Trois (03) échantillons d’eau de puits (P₁, P₂ et P₃) situés à la périphérie du plan d’eau de la retenue ont été également collectés. La profondeur du niveau statique de l’eau dans les différents puits varie de 1 m (P₁) à 2 m (P₃) en période d’étiage et les puits sont complètement immergés en période de crue.

Les échantillons stockés dans des bouteilles en polyéthylène, sont transportés dans une glacière à une température de 4 °C pour l’analyse au laboratoire sous un délai maximum de 24 h.

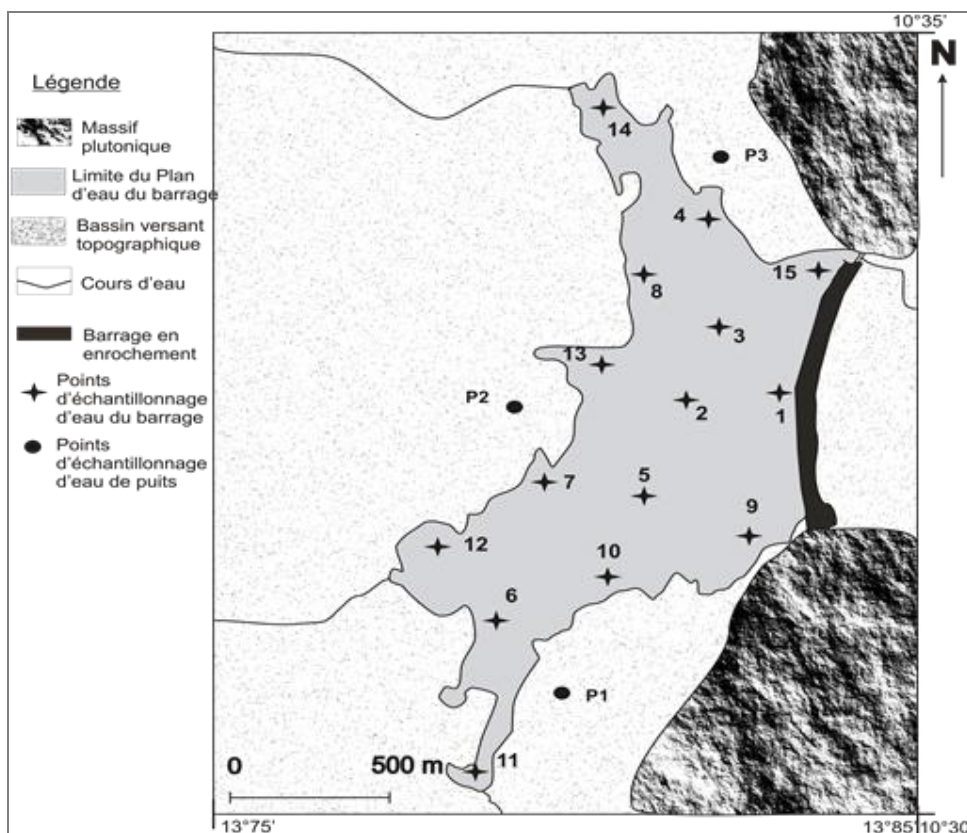


Fig. 3: Plan d’eau de la retenue et différents points d’échantillonnage

2.3. Mesures des paramètres physicochimiques et chimiques

Le pH, la température et la conductivité sont mesurés au moment de l’échantillonnage à l’aide d’un conductimètre et un pH mètre de marque HACH. Les teneurs en matière en suspension (MES) sont obtenues par

filtration sur membrane Whatman GF/C en microfibre de verre de 0,45 μm puis séchage à 105 °C pendant 24 heures et pesée.

Les concentrations en cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} et NH_4^+) et anions (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , NO_2^- et PO_4^{3-}) majeurs ont été déterminées selon les méthodes standards d'analyse des eaux (Franson et al., 1995) à l'aide d'un Spectrophotomètre type JENWAY 6320D.

Les ions Na^+ et K^+ ont été dosés par Photométrie de flamme.

Quelques métaux lourds tels que le Plomb, le cuivre, le Cadmium et l'Arsenic ont été analysés au Spectromètre à absorption atomique avec flamme du type VARIAN 50 B.

3. Résultats

3.1. Période d'étiage

En étiage, les caractéristiques physicochimiques des analyses faites sur 15 échantillons d'eau (Tabl. I) ont permis de constater que les eaux de la retenue ont une température moyenne de $27,42 \pm 1^\circ\text{C}$, un pH moyen de $8,82 \pm 0,24$ et une Conductivité moyenne de $158,33 \pm 4,88 \mu\text{s/cm}$. Les matières en suspensions ont une concentration moyenne de $1,24 \pm 0,12 \text{ g/l}$.

Sur le plan chimique, les concentrations moyennes des cations majeurs sont respectivement de $316,25 \pm 23,96$ et $83,53 \pm 2,38 \text{ mg/l}$ pour les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} , de $56,99 \pm 1,60$ et $195,31 \pm 6,44 \text{ mg/l}$ pour le Na^+ et K^+ . L'ion Ammonium (NH_4^+) est très faiblement représenté avec une concentration moyenne de $2,57 \pm 0,40 \text{ mg/l}$.

Les anions les plus abondants sont les Chlorures, les Nitrates et les Sulfates avec des concentrations moyennes respectives de $358,00 \pm 1,86 \text{ mg/l}$; $155,95 \pm 7,78$ et $130,12 \pm 0,81 \text{ mg/l}$. Les anions les moins abondants sont les Bicarbonates, les Phosphates et les Nitrites avec des teneurs moyennes respectives de $23,34 \pm 0,04 \text{ mg/l}$; $10,88 \pm 1,19$ et $1,52 \pm 0,33 \text{ mg/l}$.

L'analyse de quelques métaux lourds tels que le Plomb, le Cuivre, le Cadmium et l'Arsenic a permis l'absence totale de l'Arsenic dans les eaux de la retenue. Par contre le Cadmium, le Cuivre et le Plomb sont présents avec des concentrations moyennes plus ou moins faibles de $175,29 \pm 18 \mu\text{g/l}$; $69,13 \pm 2,65$ et $8,67 \pm 0,29 \mu\text{g/l}$ respectivement.

3.2. Période de crue

En période de crue, les 15 échantillons d'eau de la retenue (Tabl. II) présentent une Température moyenne de $25,26 \pm 0,23^\circ\text{C}$ et un maximum sensiblement similaire de $25,67^\circ\text{C}$. Le pH moyen est de $7,39 \pm 0,25$ pour une Conductivité moyenne de $162 \pm 4,55 \mu\text{s/cm}$. Les matières en suspension obtenues ont une concentration moyenne de $22,77 \pm 1,83 \text{ mg/l}$.

Les cations majeurs présentent des concentrations moyennes respectives de $311,97 \pm 17,89$ et $123,41 \pm 7,25$ mg/l pour les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} ; $297,71 \pm 29,82$ et $103,57 \pm 10,43$ mg/l pour les ions K^+ et Na^+ respectivement et $18,11 \pm 2,74$ mg/l pour les ions Ammonium (NH_4^+).

Les concentrations moyennes des anions majeurs en période de crue sont de $411,30 \pm 45,80$ mg/l pour les Nitrates, $321,01 \pm 6,92$ mg/l pour les Chlorures, $185,60 \pm 5,74$ mg/l pour les Sulfates, $138,20 \pm 27,80$ mg/l pour les Phosphates, $10,76 \pm 2,10$ mg/l pour les Nitrites et enfin $302,40 \pm 0,50$ mg/l pour les Bicarbonates qui présentent une teneur maximale de 1706,78 mg/l.

Les métaux lourds analysés pendant cette période ont des teneurs moyennes de $10,64 \pm 1,11$ $\mu\text{g/l}$ pour le Plomb, $2,25 \pm 0,52$ mg/l pour le Cadmium et $54,58 \pm 88$ $\mu\text{g/l}$ pour le Cuivre. On ne note pas de présence pour l'Arsenic.

Tabl. I: Caractéristiques physicochimiques des eaux en période d'étiage

Echantillons (Etiage) n = 15	MES	T	pH	$e25^\circ\text{C}$	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Na^+	K^+	NH_4^+	Cl ⁻	SO_4^{2-}	PO_4^{3-}	NO_3^-	HCO_3^-	NO_2^-	Cd^{2+}	Pb	Cu^{2+}	As
	g/L	°C		$\mu\text{S/cm}$	mg/L										$\mu\text{g/L}$				
Moyenne	1,24	27,42	8,82	158,33	83,53	316,25	56,99	195,31	2,57	358,00	130,12	10,88	155,95	23,34	1,52	175,29	8,67	69,13	-
Médiane	1,05	27,2	8,82	160	70,70	310,90	42,30	136,60	2,10	328,93	121,50	8,70	106,70	10,07	1,20	103,50	7,10	55,30	-
Maximum	2,53	29,7	9,22	170	210,70	431,20	121,10	441,20	7,00	603,55	301,12	37,30	550,90	81,74	5,20	702,00	17,21	177,00	-
Minimum	0,36	26,3	8,25	150	30,70	224,40	16,60	73,30	0,30	123,95	31,94	0,50	23,00	1,83	0,20	11,00	1,20	7,00	-
Ecart type	0,12	1	0,24	4,88	2,38	23,96	1,60	6,44	0,40	1,86	0,81	1,19	7,78	0,04	0,33	18,00	0,29	2,65	-
CV (%)	9,32	3,65	2,72	3,08	2,85	7,58	2,81	3,30	15,70	0,52	0,62	10,91	4,99	0,16	21,82	10,27	3,37	3,84	-

n : nombre d'échantillons CV : coefficient de variation

Tabl. II: Caractéristiques physicochimiques des eaux en période de crue

Echantillons (Crue) n = 15	MES	T	pH	$e25^\circ\text{C}$	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Na^+	K^+	NH_4^+	Cl ⁻	SO_4^{2-}	PO_4^{3-}	NO_3^-	HCO_3^-	NO_2^-	Cd^{2+}	Pb	Cu^{2+}	As
	mg/L	°C		$\mu\text{S/cm}$	mg/L										$\mu\text{g/L}$				
Moyenne	22,77	25,26	7,39	162	123,41	311,97	103,57	297,71	18,11	321,01	185,60	138,20	411,30	302,40	10,76	2,25	10,64	54,58	-
Médiane	21,20	25,3	7,44	160	106,50	297,70	91,10	294,20	15,50	326,33	191,05	121,00	336,60	127,49	7,50	1,32	7,22	49,8	-
Maximum	40,6	25,67	7,68	175	323,3	415,5	188,4	577,7	35	516,12	389,52	281,2	781,7	1706,78	35,5	7,05	28,27	133,2	-
Minimum	9,1	24,87	6,58	160	46,3	139,9	18,7	98,7	5,5	173,73	33,04	21,1	126,1	12,81	1,3	0,05	1,06	7	-
Ecart type	1,83	0,23	0,25	4,55	7,25	17,89	10,43	29,82	2,74	6,92	5,74	27,80	45,80	0,50	2,10	0,52	1,11	88	-
CV (%)	8,05	0,91	3,38	2,81	5,88	5,73	10,07	10,02	15,13	2,16	3,09	20,12	11,14	0,17	19,52	23,07	10,44	161,23	-

Tabl. III: Caractéristiques physicochimiques des eaux de puits autour de la retenue

Echantillons (Puits) n = 3	MES	T	pH	c25°C	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Cd ²⁺	Pb	Cu ²⁺	As
	g/L	°C		µS/cm	mg/L										µg/L				
Moyenne	0,62	28,10	7,05	283,33	80,57	305,27	93,27	295,37	2,97	307,41	116,86	4,53	131,47	18,10	1,48	348,00	5,81	52,87	-
Médiane	0,33	27,75	7,03	300	80,90	298,40	60,90	140,80	3,10	209,71	92,47	4,40	119,00	18,91	1,13	348,00	5,81	43,70	-
Maximum	1,33	29,45	7,48	370	119,20	341,80	177,70	638,80	5,00	507,10	241,11	9,10	258,70	30,50	2,30	615,00	8,11	74,40	-
Minimum	0,21	27,10	6,65	180	41,60	275,60	41,20	106,50	0,80	205,44	16,99	0,10	16,70	4,88	1,00	81,00	3,51	40,50	-
Ecart type	0,05	1,21	0,42	96,09	1,87	10,33	6,20	1,70	0,13	2,18	0,72	0,50	2,90	0,08	0,40	20,00	0,33	1,07	-
CV (%)	7,49	4,32	5,89	33,91	2,32	3,39	6,65	0,58	4,49	0,71	0,62	11,03	2,21	0,44	27,09	5,75	5,68	2,02	-

3.3. Nappe phréatique

L'analyse physicochimique des échantillons d'eau des puits (Tabl. III) a permis constater que la température moyenne de ces eaux est de $28,10 \pm 1,21^\circ\text{C}$ et le pH moyen de $7,05 \pm 0,42$ pour une Conductivité moyenne de $283,33 \pm 96,03 \mu\text{S/cm}$ et des matières en suspension de $0,62 \pm 0,05 \text{ g/l}$.

Les cations majeurs analysés présentent les concentrations moyennes suivantes : $305,27 \pm 10,33$ et $80,57 \pm 1,87 \text{ mg/l}$ pour le Calcium et le Magnésium, $93,27 \pm 6,20$ et $295,37 \pm 1,70 \text{ mg/l}$ pour le Sodium et le Potassium et enfin $2,97 \pm 0,13 \text{ mg/l}$ pour l'ion Ammonium.

Les anions majeurs ont les teneurs moyennes suivantes : $307,41 \pm 2,18 \text{ mg/l}$ pour les Chlorures, $116,86 \pm 0,72 \text{ mg/l}$ pour les Sulfates, $131,47 \pm 2,90 \text{ mg/l}$ pour les Nitrates, $4,53 \pm 0,50 \text{ mg/l}$ pour les Phosphates, $1,48 \pm 0,40 \text{ mg/l}$ pour les Nitrites et $18,10 \pm 0,08 \text{ mg/l}$ pour les Bicarbonates.

Trois métaux lourds ont été analysés et présentent les teneurs moyennes de $348 \pm 20 \mu\text{g/l}$ pour le Cadmium, $5,81 \pm 0,33 \mu\text{g/l}$ pour le Plomb et $52,87 \pm 1,07 \mu\text{g/l}$ pour le Cuivre.

4. Discussion

4.1. Corrélation entre les différents paramètres physicochimiques

L'analyse de corrélation de Bravais Pearson effectuée entre les différents paramètres physicochimiques en période d'étiage est présentée dans le Tableau IV tandis que celle effectuée en période de crue est présentée dans le Tableau V. Ces analyse montre qu'en étiage, il existe une corrélation significative positive entre les Bicarbonates et les Sulfates d'une part ($r = 0,581$) et d'autre part les ions Magnésium, qui matérialise la dureté des eaux, montre une corrélation significative avec les Phosphates ($r = 0,563$) et les Nitrites ($r = 0,569$). On note également une corrélation significative, mais négative entre les Sulfates et les Nitrites ($r = -0,539$). La corrélation entre les Nitrites et les Phosphates indiquent qu'ils ont probablement une même origine à savoir la minéralisation de la matière organique d'une part et

d'autre part la pollution agricole. Par contre la corrélation entre les Bicarbonates et les Sulfates n'explique pas clairement leur origine. Ils peuvent être le résultat de l'accumulation élémentaire pluviale de la saison des pluies ou celui de l'altération de la roche mère sous-jacente de la retenue.

En période de crue, on note une très forte corrélation entre le Potassium et le Bicarbonates ($r = 1$). Cette forte corrélation peut trouver son explication dans la forte altération des silicates à savoir les Feldspaths alcalins en saison pluvieuse. En effet les eaux de pluies chargées en acide carbonique attaque les minéraux silicatés contribuant ainsi à une augmentation de la concentration en cations, en Bicarbonates et en Silice (Tardy, 1969). On observe également que le Magnésium est corrélé positivement avec le Phosphate ($r = 0,583$) tandis que le Calcium est corrélé négativement avec le Sodium ($r = -0,523$). Ces corrélations sont faibles, mais témoigne dans une certaine mesure l'antagonisme entre le Calcium et le Sodium concernant leur origine, mais aussi le devenir du Phosphate et du Magnésium qui peuvent former des complexes et précipiter sous forme de Phosphate de Magnésium. Enfin, deux autres corrélation sont également significatifs et concernent d'une part les Chlorures et la Conductivité ($r = 0,567$) et d'autre part les Nitrates et l'ion Ammonium ($r = 0,638$). La corrélation entre les Nitrates et l'ion Ammonium peut faire penser l'origine biologique de ces deux éléments à savoir la minéralisation de la matière organique ou à une pollution anthropique. Les Chlorures étant toujours très fortement abondants en étiage et en période de crue, leur impact sur la Conductivité est notoire d'où une corrélation significative avec cette dernière.

Tabl. IV: Matrice corrélations des eaux en période d’été

Variables	T°C	pH	c25 °C	Ca+ +	Mg ++	Na+ Na+	K+ K+	HC O3-	Cl-	SO 4--	PO4 ---	NO 2-	NO 3-	NH 4+
T°C	1													
	0,0													
pH	40	1												
	-	-												
c25°C	0,3	0,0	1											
	56	68												
	-	-												
Ca++	0,4	0,3	0,0											
	63	40	72	1										
	-	-	-											
Mg++	0,3	0,1	0,0	0,0										
	00	51	10	66	1									
	-	-	-	-										
Na+	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2									
	17	27	38	42	84	1								
	-	-	-	-	-									
K+	0,2	0,4	0,0	0,2	0,0	0,0								
	73	31	89	68	48	46	1							
	-	-	-	-	-	-								
HCO 3-	0,2	0,0	0,3	0,0	0,2	0,2	0,0							
	94	48	54	91	34	93	86	1						
	-	-	-	-	-	-	-							
Cl-	0,2	0,2	0,0	0,3	0,0	0,0	0,2	0,28						
	20	86	29	07	81	21	07	7	1					
	-	-	-	-	-	-	-	-						
SO4--	0,2	0,0	0,0	0,1	0,3	0,2	0,1	0,58	0,0					
	25	04	95	09	51	30	56	1	37	1				
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
PO4--	0,2	0,0	0,2	0,1	0,5	0,0	0,0	0,19	0,1	0,3				
	-	75	72	59	63	98	03	7	80	76	1			
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
NO2-	0,1	0,1	0,3	0,1	0,5	0,2	0,0	0,14	0,3	0,5	0,16			
	64	22	09	32	69	17	74	7	10	39	5	1		
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
NO3-	0,0	0,0	0,0	0,3	0,1	0,4	0,0	0,13	0,2	0,1	0,38	0,0		
	97	60	02	23	62	97	35	3	22	35	2	08	1	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
NH4+	0,1	0,1	0,3	0,0	0,0	0,4	0,1	0,23	0,1	0,1	0,28	0,0	0,2	
	72	01	44	83	59	04	52	5	06	69	8	60	84	1

Tabl. V : Matrice corrélations des eaux en période de crue

Variables	T°C	pH	c25 °C	Ca+ +	Mg ++	Na+ Na+	K+ K+	HC O3-	Cl- Cl-	SO 4--	PO4 ---	NO 2-	NO 3-	NH 4+
T°C	1													
	0,03													
pH	8	1												
	-	-												
c25°C	0,36	0,38	1											
	3	0	3	1										
	-	-	-	-										
Ca++	0,40	0,35	0,04											
	5	2	3	1										
	-	-	-	-										
Mg++	0,54	0,27	0,14	0,25										
	7	8	6	3	1									
	-	-	-	-	-									
Na+	0,12	0,29	0,18	0,52	0,29									
	1	8	3	3	5	1								
	-	-	-	-	-	-								
K+	0,16	0,36	0,28	0,23	0,11	0,24								
	3	6	7	6	1	3	1							
	-	-	-	-	-	-	-							
HCO 3-	0,16	0,36	0,28	0,23	0,11	0,24	1,00							
	3	6	7	6	1	3	0	1						
	-	-	-	-	-	-	-	-						
Cl-	0,63	0,14	0,56	0,03	0,28	0,13	0,22	0,22						
	2	6	7	8	6	8	3	3	1					
	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
SO4--	0,14	0,11	0,23	0,14	0,08	0,28	0,08	0,08	0,34					
	5	8	1	6	7	3	3	3	0	1				
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
PO4--	0,45	0,32	0,12	0,13	0,58	0,58	0,20	0,20	0,14	0,15				
	6	4	3	9	3	0	3	3	5	0	1			
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
NO2-	0,02	0,29	0,06	0,15	0,01	0,22	0,39	0,39	0,09	0,03	0,22			
	8	8	9	9	1	4	6	6	0	2	2	1		
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
NO3-	0,11	0,12	0,20	0,04	0,40	0,07	0,13	0,13	0,21	0,16	0,10	0,1		
	3	6	6	6	0	9	0	0	4	6	8	98	1	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
NH4+	0,12	0,17	0,26	0,10	0,32	0,36	0,18	0,18	0,41	0,09	0,33	0,1	0,6	
	1	9	5	4	0	4	0	0	4	4	7	04	38	1

4.2. Bilan qualitatif et évolution saisonnière des caractéristiques physicochimiques

L’analyse des résultats obtenus pendant les périodes d’été et de crue révèle que les températures des eaux de la retenue sont légèrement plus élevées en été que pendant la période de crue. Cette différence d’environ

2 °C peut s'expliquer par l'exposition du plan d'eau à l'ensoleillement intense des mois chauds de mars et avril, couplé au faible mouvement de brassage de l'eau de la retenue (Dandelot et al., 2005). Le léger abaissement des températures pendant la période de crue trouve son explication par contre dans le brassage des eaux de la retenue par les écoulements pluviale à l'intérieur de la retenue et l'adoucissement de l'ensoleillement par la couverture nuageuse.

Le pH, légèrement alcalin en période de d'étiage, revient à la neutralité en période de crue. D'après les travaux d'Alayat (2006), le pH d'une eau de surface dépend de la concentration du CO₂. La photosynthèse algale consomme beaucoup de CO₂ et provoque ainsi une augmentation notable du pH des eaux. La respiration, au contraire, contribue à son abaissement par production de gaz carbonique. Partant du constat que la retenue de Mokolo est situé à environ 800 m d'altitude, la pression du CO₂ y est moins important qu'au niveau de la mer et par conséquent sa dissolution dans l'eau de la retenue est faible. Les activités biologiques au sein de la retenue consommant plus de CO₂ que sa dissolution, il s'en suit alors une augmentation du pH en étiage. Par contre en période de crue, les quantités importantes de matières organiques apportées par les eaux de ruissellement vers la retenue contribuent par le processus de minéralisation de la matière organique à l'augmentation du CO₂ dissous donc à une baisse du pH suite à une forte production des ions Bicarbonates dont les concentrations moyennes passent de 23,34 ± 0,04 mg/l en étiage à 302,40 ± 0,50 mg/l en période de crue.

Les mesures de la Conductivité électrique d'une eau traduisent sa teneur en sels dissous dont l'intérêt se manifeste surtout dans leur évolution spatiotemporelle (Stournaras et al., 1989). Dans le cadre de notre étude, il apparait que la conductivité est globalement faible en dessous de 200 µs/cm, même si une légère augmentation de celle-ci en période de crue est notée. Cette faible teneur peut s'expliquer par une origine presque constante de l'acquisition minéralogique à savoir l'altération des roches environnante et les apports pluviaux. Cependant la légère augmentation de la minéralisation en période de crue, révèle l'importance de la minéralisation de la matière organique telle que démontrée par la baisse du pH et surtout les apports d'ions minéraux par les eaux de ruissellement pluviales.

Les cations majeurs, présentant l'ordre suivant d'abondance : Ca²⁺ > K⁺ > Mg²⁺ > Na⁺ > NH₄⁺ en étiage, gardent le même ordre d'abondance en période de crue. Cependant, on note une augmentation en période de crue de la teneur de la majorité des cations majeurs excepté le calcium. Les augmentations sont respectivement d'environ 51 % pour le Potassium, 32 % pour le Magnésium, 45 % pour le Sodium et enfin 88 % pour l'ion Ammonium. Ces variations des concentrations en période de crue peuvent

être imputées au lessivage des sols par les eaux de ruissellement (Dufour, 1984). L'altération des minéraux ferromagnésiens des roches du bassin versant sont à l'origine de l'augmentation des teneurs en Magnésium tandis que celle des minéraux feldspathiques (plagioclases et feldspaths alcalins) contribue à l'augmentation des teneurs en Calcium, Sodium et Potassium. L'ion Ammonium provient essentiellement des actions anthropiques telles que les activités agropastorales et la minéralisation de la matière organique (Rosenfeld, 1979).

Les anions les plus abondants en étiage sont par ordre chronologiques des concentrations moyennes les Chlorures, suivi des Nitrates et enfin les Sulfates. Les moins abondants sont respectivement les Phosphates, les Nitrites et les Bicarbonates. En absence des eaux de ruissellement pendant la période d'étiage, les teneurs en anions ne peuvent avoir pour origine que l'accumulation élémentaire issue de la saison des pluies de l'année écoulée ou les apports de la nappe phréatique environnante. Cependant, les teneurs moyennes observées au niveau de la nappe phréatique au niveau des puits mettent en évidence le même ordre chronologique d'abondance des cations, mais ces teneurs sont inférieures à celle des eaux de la retenue pendant la même période. Les concentrations moyennes en anions de la période de crue mettent en évidence l'origine anthropique de la plupart de ces derniers (Taoufik, 2002). En effet, les concentrations moyennes les plus importantes sont par ordre chronologique celles des Nitrates, suivi des Chlorures, des bicarbonates, des Sulfates et enfin des Phosphates. Les Nitrites restent faibles. Les fortes augmentations de ces anions par rapport à la période d'étiage avec des proportions d'environ 62 % pour les Nitrates, 30 % pour les Sulfates, 86 % pour les Nitrites, 92 % pour les Phosphates et Bicarbonates sont imputables aux eaux de ruissellement pluviales qui drainent les zones agricoles du bassin versant.

4.3. Faciès chimiques et acquisition de la minéralisation des eaux

D'une manière générale, quel que soit la période (étiage ou crue) les faciès des eaux sont presque identiques.

En étiage, le diagramme de piper (Fig. 4(a)) montre que le faciès des eaux de la retenue est du type chloruré et sulfaté calcique et magnésien avec une tendance vers le faciès hyper chloruré calcique et Hyper sulfaté calcique. Le cation le plus dominant étant le Calcium et les anions, les Chlorures.

En période de crue, le faciès des eaux (Fig. 4(b)) est globalement identique à celui de la période d'étiage à savoir chloruré et sulfaté calcique et magnésien. Cependant, on observe que sur le plan des cations dominants, le Calcium et le Potassium sont prépondérants.

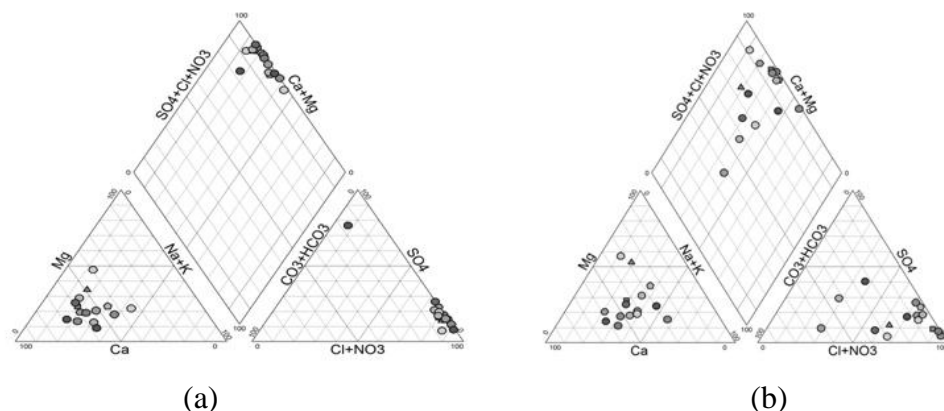


Fig. 4: Faciès (Diagramme de Piper) des eaux de la retenue en période d'été (a) et crue (b).

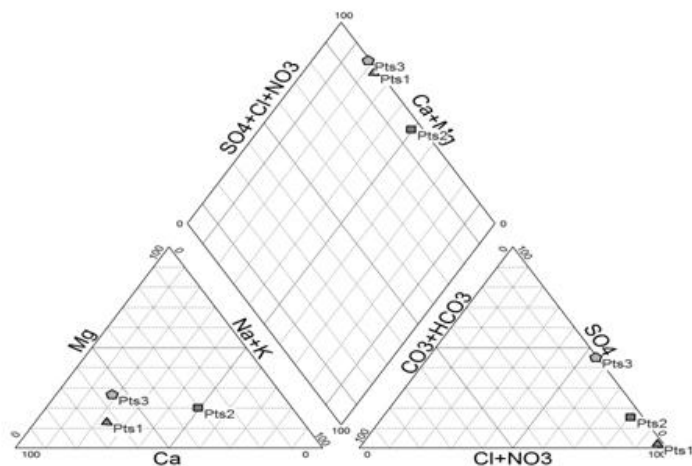


Fig. 5: Faciès (Diagramme de Piper) des eaux de puits autour de la retenue.

Sur le plan des anions dominants, les Chlorures, les Sulfates et les Nitrates sont les plus abondants.

L'observation du diagramme de faciès des eaux de puits autour de la retenue (Fig. 5) révèle que le faciès des eaux de puits, issues de la nappe phréatique, est identique au faciès des eaux de la retenue en été. Ce constat met en évidence l'impact de la nature géologique des terrains sur la ressource en eau du réservoir.

En effet, les roches du substratum et du bassin versant amont de la retenue étant de nature granitique voir migmatitique, les travaux de Faillat et Drogue (1993) sont révélateurs de l'origine de la plupart des ions et de leur abondance relative. Selon ces auteurs, l'hydrolyse des granites ou migmatites, riches en feldspaths alcalins et en plagioclases basiques mais

pauvres en ferromagnésiens, explique que les teneurs en Ca^{2+} et en K^+ soient dominantes pour les cations. La proportion assez importante d'anorthite dans les plagioclases, variété la plus facilement altérable, justifie que la concentration en Ca^{2+} soit supérieure à celle en K^+ . Si une partie du Cl^- et de SO_4^{2-} peut provenir des roches, notamment des inclusions fluides, des sels inter-granulaires et des sulfures, à la lumière du tableau II, il est vraisemblable que Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- et une partie des cations, proviennent principalement de la pluie et du lessivage des sols par celle-ci.

4.4. Vulnérabilité environnementale et enjeux de protection de la ressource

La situation en zone tropicale sahélienne de la retenue d'eau de Mokolo rend la ressource en eau très vulnérable aux contraintes climatiques et anthropiques. L'impact des aléas climatiques sont matérialisés au niveau de la qualité de la ressource en eau par sa variation en termes de composition physicochimique pendant les périodes successives d'étiage et de crue. L'étiage se caractérise par une somme moyenne en cations majeurs (TZ^+) de $30,25 \pm 4,77$ méq/l et anions majeurs (TZ^-) de $15,09 \pm 4,53$ méq/l. La balance ionique est excédentaire en cations d'environ 34 %. Les ions les plus représentatifs étant le Calcium et le Potassium pour les cations majeurs tandis que pour les anions majeurs c'est les chlorures, les sulfates et les nitrates. En période de crue, il y a une tendance à un rééquilibrage entre la somme des cations ($\text{TZ}^+ = 38,85 \pm 6,79$ méq/l) et des anions ($\text{TZ}^- = 28,74 \pm 6,23$ méq/l), car la balance ionique entre les cations et les anions n'est plus que de 15 %. Ceci s'explique par une forte augmentation des teneurs des anions tels que les Nitrates, Bicarbonates, Phosphates et Nitrites.

L'impact anthropique sur la ressource en eau est mis en évidence par la supériorité des concentrations de certains ions par rapport aux normes acceptables pour une eau de consommation humaine (Tabl. VI). D'après ce tableau, on s'aperçoit que les indicateurs de pollution anthropique agricole tels que les Nitrites, Nitrates et Phosphates présentent globalement des concentrations supérieures aux normes admises pour la consommation. Il en est de même de l'ion Ammonium qui peut trouver son origine dans le lessivage par les eaux pluviales des excréments et urines d'animaux d'élevage. Dans le même ordre d'idée, les fortes teneurs en Phosphates issues probablement de l'utilisation incontrôlée des engrais en amont du bassin versant peuvent conduire à la longue à l'eutrophisation de la retenue (Ménésquen et Janvier, 2001).

Par ailleurs, tous les métaux lourds analysés ont des teneurs qui ne sont pas très éloignées des normes admises pour une eau de consommation à l'exception du Cadmium. Cependant un suivi de la variation de leur concentration dans le temps est nécessaire pour un contrôle de leur évolution.

L'analyse de l'eau, issue de la station de traitement des eaux de la retenue à des fins d'alimentation en eau potable des villes environnantes, montre que certains paramètres tels que les Nitrates et Nitrites gardent toujours une forte concentration après le traitement de potabilisation. Ceci peut avoir des effets nocifs sur les consommateurs d'où la nécessité d'une mesure de protection de la ressource en amont du bassin versant de la retenue.

Tabl.VI: Paramètres physicochimiques et Normes de qualité européenne.

Paramètres	Eaux de la retenue en période d'été	Eaux de la retenue en période de crue	Eau potable après traitement	Normes (Union européenne)
	<i>Moyenne</i>			
MES (mg/L)	1240,00 ± 120	22,77 ± 1,83	0,07 ± 0,02	0 20 – 22
T (°C)	27,42 ± 1	25,26 ± 0,23	25,7 ± 0,5	°C
pH	8,82 ± 0,24	7,39 ± 0,25	6,77 ± 0,10	6,5 - 9,5
c25°C (µs/cm)	158,33 ± 4,88	162 ± 4,55	180 ± 0,01	2500 µs/cm
Mg ²⁺ (mg/l)	83,53 ± 2,38	123,41 ± 7,25	216,1 ± 25,20	150 mg/l
Ca ²⁺ (mg/l)	316,25 ± 23,96	311,97 ± 17,89	90,8 ± 7,60	200 mg/l
Na ⁺ (mg/l)	56,99 ± 1,60	103,57 ± 10,43	63,1 ± 1,10	200 mg/l
K ⁺ (mg/l)	195,31 ± 6,44	297,71 ± 29,82	37,9 ± 0,80	12 mg/l
NH ₄ ⁺ (mg/l)	2,57 ± 0,40	18,11 ± 2,74	ND	0,5 mg/l
Cl ⁻ (mg/l)	358,00 ± 1,86	321,01 ± 6,92	6,57 ± 4,10	250 mg/l
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	130,12 ± 0,81	185,60 ± 5,74	76,05 ± 8,10	250 mg/l
PO ₄ ³⁻ (mg/l)	10,88 ± 1,19	138,20 ± 27,80	5,5 ± 0,60	5 mg/l
NO ₃ ⁻ (mg/l)	155,95 ± 7,78	411,30 ± 45,80	85,7 ± 8,10	50 mg/l
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	23,34 ± 0,04	302,40 ± 0,5	42,7 ± 3,05	-
NO ₂ ⁻ (mg/l)	1,52 ± 0,33	10,76 ± 2,10	0,29 ± 0,05	0,5 mg/l 0,005 mg/l
Cadmium (µg/l)	175,29 ± 18	2254 ± 52	ND	0,01 mg/l
Plomb (µg/l)	8,67 ± 0,29	10,636 ± 1,11	ND	0,01 mg/l
Cuivre (µg/l)	69,13 ± 2,65	54,58 ± 88	ND	2 mg/l
Arsenic (µg/l)	ND	ND	ND	0,01 mg/l

5. Conclusion

Il se dégage de cette étude, le rôle des variations hydrologiques (étiage et crue) inhérentes aux variations météorologiques dans l'évolution temporelle des paramètres de qualité et des caractéristiques hydrochimiques de la ressource en eau de la retenue de Mokolo.

L'étiage se caractérise par une teneur moyenne en cations majeurs supérieure à celle des anions majeurs. La balance ionique est excédentaire en cations d'environ 34 %. Les ions les plus représentatifs étant le Calcium et le Potassium pour les cations majeurs tandis que pour les anions majeurs c'est les chlorures, les sulfates et les nitrates.

La période de crue révèle une tendance à un rééquilibrage de la teneur moyenne en cations et en anions, car la balance ionique entre les cations et les anions n'est plus que de 15 % suite à une forte augmentation des concentrations des anions tels que les Nitrates, Bicarbonates, Phosphates et Nitrites.

Sur le plan de la qualité, il ressort que les indicateurs de pollution anthropique agricole tels que les Nitrites, Nitrates et Phosphates présentent globalement des concentrations supérieures aux normes admises pour la consommation. Par ailleurs, les métaux lourds analysés ont des teneurs qui ne sont pas très éloignées des normes admises pour une eau de consommation à l'exception du Cadmium.

Sur le plan hydrochimique, en étiage, le faciès des eaux de la retenue est du type chloruré et sulfaté calcique et magnésien avec une tendance vers le faciès hyper chloruré calcique et Hyper sulfaté calcique. Le cation le plus dominant étant le Calcium et les anions, les Chlorures. En période de crue, le faciès des eaux est globalement identique à celui de la période d'étiage à savoir chloruré et sulfaté calcique et magnésien. Cependant, on observe que sur le plan des cations dominants, le Calcium et le Potassium sont prépondérants.

Les analyses statistiques (Corrélation de Bravais Pearson) des paramètres physico-chimiques indiquent que les facteurs hydroclimatiques et anthropiques déterminent l'origine et de l'évolution spatio-temporelle des paramètres physicochimiques et par-delà les caractéristiques hydrochimiques.

Références:

- Alayat H. (2006) - Evolution spatio-temporelle du chimisme des eaux thermo minérales des monts de la Cheffia (N-E algerien). *Kartologia*, n° 48, pp. 23-28.
- Dandelot S., Matheron R., Le Petit J., Verlaque R., Cazaubon A., (2005) - Variations temporelles des paramètres physicochimiques et microbiologiques

des trois écosystèmes aquatiques (Sud-Est de la France) envahis par des *Ludwigia*. *C.R. Biologies* 328, pp. 991-999.

Dufour P. (1984) - Production primaire d'une lagune tropicale (Ebrie, cote d'ivoire), Facteurs naturels et anthropiques. Thèse uni. Pierre et marie-curie, paris 164 p.

Faillat J. P., Drogue C. (1993) - Différenciation hydrochimique de nappes superposées d'altérites et de fissures en socle granitique. *Journal des Sciences hydrologiques*, Vol. 38, n° 3, pp. 215-229.

Franson M. A. H., Eaton A. D., Clesceri L. S., Greenberg A. E. (1995) - Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington: American Public Health Association, 19th ed, 993 p.

Ménesquen A., Janvier (2001) - L'eutrophisation des eaux marines et saumâtres en Europe en particulier en France, Rapport IFREMER pour la Commission Européenne, DGENV. B1. 59p.

Olivry J. C. (1986) - Fleuves et rivières du Cameroun. Mesres-Orstom. Paris, Orstom, coll. Monographies hydrologiques n° 9, 733 p.

Olivry J. C. (1974) - Étude hydrologique du Haut-Bassin du Mayo Tsanaga à Mokolo. Résultats de la campagne 1974. Yaoundé, Orstom, 40 p., graphiques.

Rémini B., Leduc C., Hallouche W. (2009) - Évolution des grands barrages en régions arides : quelques exemples algériens. *Sécheresse*, Vol. 20, n°1, pp. 96-103.

Rosenfeld J. (1979) - Ammonium adsorption in nearshore anoxic sediments. *Limnol. Oceanogr.*, 24 (2): 356-364.

Ryding S. O., Rast W. (1994) - Le contrôle de l'eutrophisation des lacs et des réservoirs. Collection sciences de l'environnement. 294 p.

Stournaras G., Panagoupoulos A., Sotiropoulou K. (1989) - La signification hydrogéologique des conditions hydrochimiques et géomorphologiques d'un terrain gypseux. Les sources de Drymos (Grèce occidentale). *Annales de l'université de Provence*, tome XVI, n° 4, pp. 311-320.

Taoufik M. (2002) - Hydrogéochimie de la partie aval du bassin Oum Rbia (Imfout - Estuaire d'Azemmour) : Évaluation trophique et dynamique du phosphore. Th. Doc. National. Univ. Hassan II - Aïn Chock, Casablanca, Maroc, 230 p.

Tardy. (1969) - Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Mem. Du service de la carte Géol. D'Alsace et de Lorraine, n° 31.