

APPLICATION DES MÉTHODES STATISTIQUES À L'ÉTUDE HYDROCHIMIQUE DES EAUX D'UN HYDROSYSTÈME TROPICAL : CAS DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE ZIO (TOGO)

Tampo L.

Gnazou M.

Akpataku V.

Bawa L.

Djaneye-Boundjou G.

Laboratoire de Chimie des eaux, Faculté des Sciences, Université de Lomé

Nuto Y.

Laboratoire d'Entomologie Appliquée, Faculté des Sciences,
Université de Lomé

Oueda A.

Guenda W.

Laboratoire de Biologie et Ecologie Animale, UFR/SVT,
Université de Ouagadougou

Abstract

Zio River is the only perennial river of Lake Togo basin. It passes through many urban areas including capital Lomé which it receives discharges of all kinds and subjected to several human pressures. This study aims to characterize the physicochemical quality of water from the source to the river mouth, identify pollution sources and highlight the impact of human activities on these waters quality. For this purpose water samples were taken during four times at each site and Physicochemical analyzes were done in the laboratory according to AFNOR methods. The results of these analyzes were accompanied by statistical analysis. Principal Component Analysis identified parameters influenced by human activities or effluents and those related to mineralization process. Factor scores of sampling sites on the bidimensional plane (F1XF2) showed increasing pollution or disturbance gradient of sites from upstream to downstream. Physicochemical quality study reveals that sites located at upstream are good quality, record the highest levels of dissolved oxygen (6 to 14.6 mgO₂ / L) and are suitable for any purpose contrary to downstream sites waters, degraded by human activities and

record lower levels of dissolved oxygen ($0.6\text{mgO}_2/\text{L}$). Piper diagram showed dominance of Ca-HCO_3 water type with the presence of Na-HCO_3 water type and a few Na-Cl water type.

Keywords: Physicochemical quality, pollution, anthropogenic activities, Zio basin

Résumé

Le Zio est le seul cours d'eau pérenne du bassin du Lac Togo. Il traverse de nombreuses agglomérations urbaines parmi lesquelles la capitale Lomé dont il reçoit des rejets de toutes sortes et soumis à plusieurs pressions anthropiques. Cette étude vise à caractériser la qualité physicochimique de ces eaux de la source à l'embouchure de la rivière, identifier les sources de pollution et mettre en évidence l'impact des activités anthropiques sur la qualité de ces eaux. A cet effet les échantillons d'eau ont été prélevés quatre fois dans chaque site et les analyses Physicochimiques effectuées au laboratoire selon les méthodes AFNOR. Les résultats de ces analyses ont été accompagnés d'études statistiques. L'analyse en composante principale a permis d'identifier d'une part les paramètres influencés par les activités anthropiques et le pluvio-lessivage et d'autres part ceux liés au processus de minéralisation. La carte factorielle des sites dans le plan F1XF2, présente un gradient de pollution ou de perturbation des stations, croissant de l'amont vers l'aval. L'étude de la qualité physicochimique globale révèle que les stations situées à l'amont sont d'une bonne qualité, enregistrent les plus fortes teneurs en oxygène dissous (6 à $14.6\text{mgO}_2/\text{L}$) et se prêtent à tous les usages contrairement aux eaux des stations de l'aval dégradés par les activités anthropiques et enregistrent les plus faibles teneurs en oxygène dissous allant jusqu'à $0.6\text{mgO}_2/\text{L}$. Le diagramme de Piper a mis en évidence dans ces eaux, la dominance du faciès bicarbonaté calcique avec la présence de quelques points bicarbonatés sodiques ainsi que les eaux chlorurées sodiques.

Mots clés: Qualité physicochimique, pollution, activités anthropiques, bassin du Zio

Introduction

L'eau est une ressource naturelle indispensable à la vie dans tout écosystème. Le maintien de sa qualité est une préoccupation majeure pour une société qui doit subvenir à des besoins en eau de plus en plus importants (Haouchine, 2011; Foto et al, 2011). Bien que l'on se tourne vers les eaux souterraines pour l'approvisionnement en eau potable, les eaux de surfaces demeurent une ressource très capitale pour le développement durable. Les

cours d'eau contribuent à l'installation des barrages hydroélectriques et à l'aménagement des zones humides. Ces zones humides sont souvent le siège d'un large éventail d'activités socioéconomiques comme: les cultures vivrières, le maraichage, l'élevage, la pêche, l'horticulture, la saunaison et le tourisme. Ils se développent également des sablonnières et des gravières dans ces zones humides. (Acreman et al., 1996; Dixon et Wood, 2003).

Ainsi, les réseaux hydrographiques du monde entier sont plus ou moins modifiés par les activités humaines (Everard et Powell, 2002). En associant les facteurs globaux tels que les changements climatiques, la plupart des cours d'eau ont souffert et continuent de souffrir des effets anthropiques : la régression des espèces aquatiques, de la diminution des stocks de poissons, la réduction de la qualité et de la quantité d'eau utilisable.

Dans de nombreuses régions de l'Afrique Subsaharienne, les zones humides sont sous une haute pression due à l'utilisation des terres et aux changements climatiques alors qu'elles sont reconnues comme des ressources vitales pour la sécurité alimentaire et moyens de subsistance des ruraux (Pieter et al., 2013). Le bassin versant de la rivière Zio fait partie de ces zones humides où se développent la riziculture, la culture de la canne à sucre, les sablonnières et gravières. La pêche y est également pratiquée. La rivière Zio contribue fortement à l'irrigation et son bassin draine de nombreuses agglomérations dont il reçoit les déchets et les effluents domestiques et industriels. Malgré ces fortes pressions anthropiques, l'eau de la rivière Zio sert à l'approvisionnement en eau potable en amont comme en aval. Certaines écoles l'utilisent dans les cantines scolaires sans traitement préalable. Ainsi, la présente étude vise principalement à caractériser la qualité physicochimique des eaux du bassin versant de l'amont vers l'aval afin de mettre en évidence l'état de qualité et le degré de pollution de l'eau, de situer les sources de pollution et d'établir un gradient de perturbation ou de dégradation de la source à l'embouchure. Cette étude est indispensable à la disposition des outils pour la mise en place d'un système de gestion intégrée des eaux de ce bassin.

Matériel et méthodes

Présentation de la Zone d'étude

Le bassin versant du Zio draine une superficie effilée d'environ 3400 km², d'orientation NNO-SSE entre les latitudes 6°5'N et 7° 18'N et les longitudes 0° 15'E et 1° 40'E (figure 1). Il s'étend à travers trois zones écologiques. La zone écologique V à paysage de savane arborée ou arbustive au Sud, la zone écologique III à paysage de savane arborée et de galerie au centre à la latitude de Méssiobé et de Kati et une grande partie dans la zone écologique IV à paysage forestier au Nord avec de nombreux affluents. Le

Zio développe à partir d'Alokoegbé jusqu'au Lac Togo une vaste zone d'inondation (partie aval du Zio) et reçoit des eaux de nombreux affluents en provenance des monts Togo abondamment arrosés. A l'amont, les activités anthropiques dans le bassin se résument à l'agriculture sous pluie et irriguée. Ces activités s'amplifient et se diversifient en allant vers l'aval où le Zio traverse de nombreuses agglomérations.

Stations et Périodicité des Prélèvements

Stations de prélèvement

Après une campagne de prospection, 30 stations sont sélectionnées de l'aval à l'amont selon trois critères : (1) l'accessibilité aux stations, (2) la répartition sur l'ensemble du réseau hydrographique et (3) la localisation par rapport aux sources potentielles de pollution.

Périodicité des prélèvements

Au cours de l'étude prospective nous avons suivi les variations hydrologiques et physicochimiques par la mesure de la vitesse du courant d'eau, la profondeur et largeur du lit, les sels totaux dissous (TDS), la conductivité, le pH et l'Oxygène dissous. Ces mesures nous ont permis de fixer quatre campagnes d'échantillonnage par rapport aux régimes hydrologiques de l'année:

- Première campagne (Décembre 2012 à Janvier 2013), correspondant au régime de transition entre les hautes eaux et les basses eaux (Saison sèche)
- Deuxième campagne (Mars - Avril 2013), correspondant au régime des basses eaux ou d'étiage (Saison sèche)
- Troisième campagne (Juillet 2013), correspondant au régime de transition entre les basses eaux et les hautes eaux (Saison Pluvieuse)
- Quatrième campagne (Septembre - Octobre 2013), correspondant au régime des hautes eaux ou des crues (Saison Pluvieuse).

Ainsi, chaque station a été visitée 4 fois de Décembre 2012 à Octobre 2013.

Méthodes d'analyses physicochimiques

A chaque visite de terrain, la température, la conductivité, les sels dissous et l'Oxygène dissous sont mesurés *in situ* à l'aide d'un multiparamètre type HANNA. Un échantillon d'eau par site est prélevé dans une bouteille en plastique de 1,5 L préalablement lavée et rincée à l'eau distillée. Les échantillons prélevés sont conservés dans une glacière pour les autres analyses dans les 48h au laboratoire. Les méthodes décrites par AFNOR nous ont servi pour les différentes analyses physicochimiques. Le tableau 1 résume les différentes méthodes AFNOR et le matériel utilisés pour chaque paramètre.

Tableau 1 : Méthode et matériel utilisés pour l'analyse des paramètres

Paramètres	Méthodes	Equipements/outils
pH	Electrométrie (NFT90-017	pHmètre WTW pH330i
MES	Gravimétrie (872:1996)	Pompe sous pression
O ₂ dissous	Oxymétrie/volumétrie (NF25813/ ISO5813)	Oxymètre WTW
Couleur	Platine-Cobalt	Verrerie et réactifs
Transparence	Methode Sécchi	Disque de sécchi
Conductivité	Conductimétrie (NFT90-111)	Conductimètre WTW
Ca ²⁺ , Mg ²⁺	Complexométrie à l'EDTA (NFT90-003)	Verrerie et réactifs
HCO ₃ ⁻	Volumétrie à partir du TAC(ISO 9963-I)	Verrerie et réactifs
KMnO ₄	Milieu acide et à chaud (test de Guerrée)	Verrerie et réactifs
Cl-	Volumétrie (NFT90-014)	Verrerie et réactifs
Na, K	Spectrophotométrie	Spectrophotomètre flamme
NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , Fe SO ₄ ²⁺ et Mn ²⁺ , PO ₄	Méthode spectrophotométrique (NFT-90- 015, NFT90-045, NFT90-013, NFT90- 017)	Spectrophotomètre moléculaire Digitron Elvi

Méthodes d'analyses statistiques

Les tests de variance ANOVA de Kruskal-Wallis ont été utilisés pour la variabilité de la qualité physicochimique selon les régimes hydrologiques. Le test U de Mann-Whitney a été utilisé pour la variabilité entre les saisons et les variabilités entre les sources d'eau. Ces deux tests, les diagrammes ainsi que la statistique descriptive ont été réalisés par le logiciel Statistica 7 pour décrire les tendances à l'évolution et à la distribution des données. L'analyse en composante principale (ACP) largement utilisée pour interpréter les données hydrochimiques des hydrosystèmes (El Morhit et al., 2008; Makhouk et al., 2011; Lamrani et al., 2011; Belghiti et al., 2013) ainsi que la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) ont été réalisées à l'aide du logiciel Xlstat.

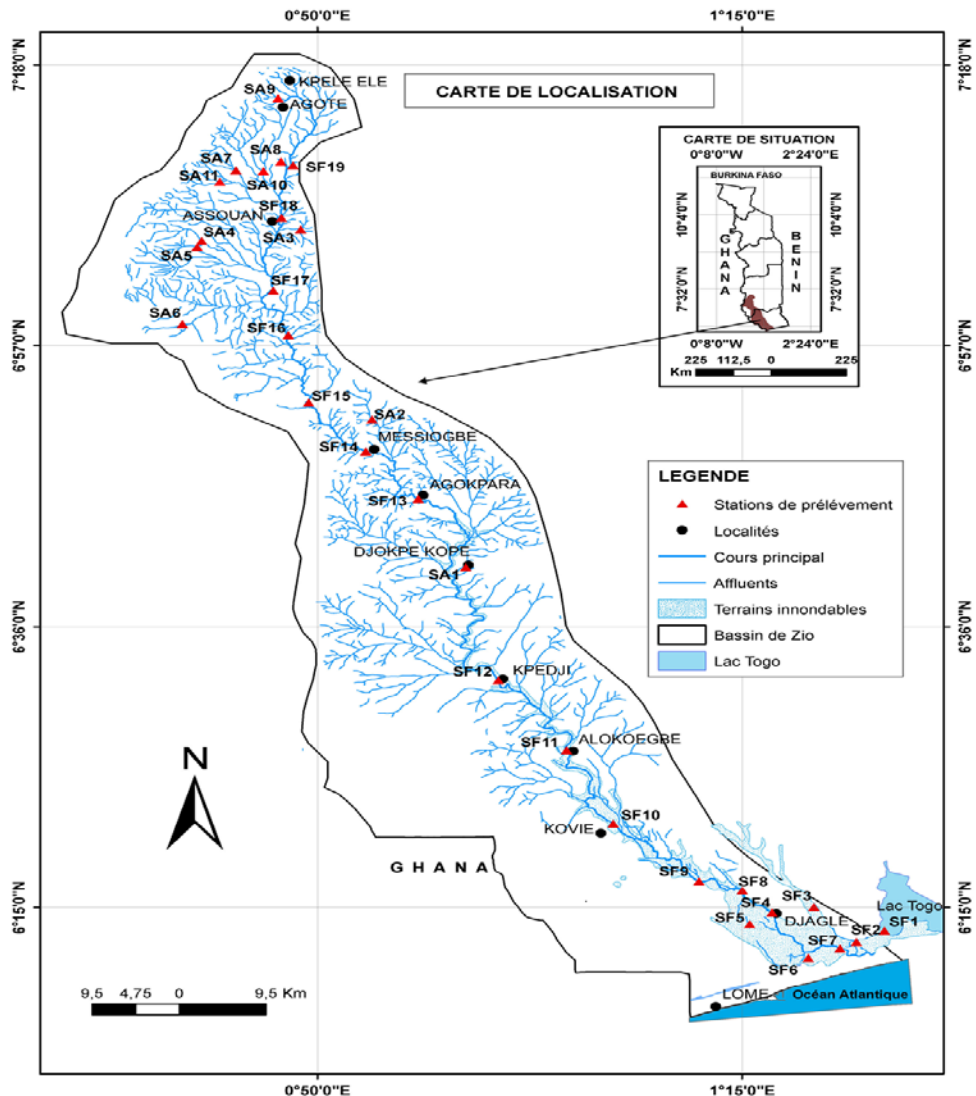


Figure 1 Carte de localisation des sites et de la zone d'étude

Résultats

Aperçu Global et variabilité de la qualité physicochimique selon l'hydrologie

La gamme de distribution des paramètres physicochimiques (Tableau 2) dans l'ensemble des 30 stations et pendant les quatre régimes montre des eaux relativement douce dans le bassin du Zio avec plus de 98% des conductivités entre 25 et 1000 $\mu\text{s/cm}$. Dans ces eaux douces, les ions Ca et Na sont les cations dominants. L'anion dominant étant l'ion HCO_3^- . De très fortes conductivités (889,4 à 10670 $\mu\text{s/cm}$) ont été mesurées dans les stations SF1, SF2, SF3 et SA2 pendant le régime des basses eaux. Ces eaux

saumâtres sont caractérisées par la dominance des ions Na et Cl. Les teneurs en O₂ dissous indiquent des eaux sursaturées en oxygène (O₂ > 7mgO₂/L) et des eaux à caractère souillé, très pauvres en Oxygène. Les teneurs en NO₃ sont relativement faibles avec des valeurs 5 à 20 fois plus petites que la valeur seuil de l'OMS (50 mg/L). Les teneurs en Mn²⁺ sont proches entre la période des basses eaux et la période de transition hautes eaux-basses eaux avec une valeur maximale de l'ordre de 2,5 mg/L. Les teneurs en fer sont généralement plus élevées que celles du Mn²⁺ avec une valeur maximale de 2,3 mg/L en période de transition hautes eaux-basses eaux et des valeurs maximales entre 5 et 8 mg/L pour les autres périodes d'échantillonnage. L'apport de ces éléments traces métalliques semble dépendre du régime hydrologique. Le test d'ANOVA de Kruskal-Wallis appliqué à tous les paramètres montre une différence statistiquement significative ($p < 0,05$) du Fer et du Mn²⁺. Le test montre également que les régimes hydrologiques affectent significativement ($p < 0,05$) les températures, O₂, MES, Couleur, Oxydabilité au KMnO₄, NO₂, NO₃, PO₄, SO₄ et Cl.

Tableau 2: Valeurs moyennes et étendu des paramètres physicochimiques mesurés et test de Kruskal-wallis

T°C: Température, Cond: Conductivité, O₂: Oxygène dissous, Coul: Couleur, MES: Matières en Suspension, KMn: Oxydabilité au Permanganate de Potassium (KMnO₄), Tran: Transparence

	T°C	pH	Cond	O ₂	Tran	MES	Coul	KMn	HCO ₃	Ca	Mg	NO ₂	NO ₃	NH ₄	PO ₄	Mn	Fe	SO ₄	Cl	Na	K
transition Hautes eaux-Basses eaux																					
Moy	27,01	7,05	164,92	6,43	62,67	40,83	13,83	6,04	78,68	10,54	6,53	0,03	1,47	0,28	0,06	0,39	0,87	4,73	13,00	15,20	2,40
Min	25,00	6,42	25,30	0,80	7,00	12,00	5,00	0,60	18,50	3,20	0,96	0,01	0,30	0,01	0,02	0,01	0,12	0,46	3,00	1,60	0,60
Max	29,60	7,80	889,40	11,00	100,00	80,00	25,00	24,70	186,00	26,40	15,36	0,10	7,80	1,80	0,36	2,57	2,30	11,70	56,06	63,00	11,80
Basses eaux																					
Moy	27,50	7,10	867,86	5,96	69,70	135,77	22,50	8,07	82,62	10,00	4,23	0,09	0,95	0,39	0,06	0,17	1,27	4,65	190,32	141,87	8,04
Min	26,00	6,34	25,40	0,60	10,00	36,00	5,00	1,40	20,74	2,40	0,48	0,01	0,22	0,01	0,01	0,03	0,08	0,56	0,80	1,70	0,60
Max	28,90	7,90	10670,00	8,80	100,00	300,00	70,00	30,70	304,20	27,20	13,92	0,48	3,11	5,60	0,26	2,20	5,80	12,80	2803,08	1860,00	71,00
Transition Basses eaux-Hautes eaux																					
Moy	27,43	6,96	127,08	7,58	66,83	160,83	29,83	11,25	81,20	10,50	5,00	0,08	1,17	0,20	0,04	0,09	1,69	5,15	12,19	16,33	3,27
Min	26,00	6,50	25,30	3,70	25,00	60,00	10,00	2,40	18,30	2,40	0,48	0,01	0,26	0,01	0,01	0,02	0,02	0,14	2,00	2,50	0,40
Max	28,90	7,70	530,00	13,00	100,00	325,00	70,00	30,50	339,16	56,00	25,44	0,50	5,66	0,75	0,20	0,30	7,77	11,34	54,30	52,00	8,00
Hautes eaux																					
Moy	26,60	7,02	161,40	8,31	63,17	158,37	30,17	7,56	97,59	12,07	6,19	0,06	1,59	0,18	0,03	0,09	1,72	1,09	9,90	18,83	3,48
Min	20,00	6,42	25,30	2,20	15,00	60,00	10,00	2,00	24,40	2,40	0,96	0,02	0,15	0,01	0,01	0,03	0,19	0,05	1,00	3,90	0,30
Max	29,50	7,80	554,00	14,60	100,00	320,00	100,00	21,00	325,74	56,00	28,80	0,30	4,80	0,74	0,08	0,30	6,53	3,30	63,53	56,80	8,90
H(K-W)	16,333	2,485	0,560	10,327	1,052	59,651	25,932	14,399	1,668	1,179	3,955	11,002	9,089	5,255	11,409	13,113	9,276	34,649	9,565	3,001	5,504
p	0,001	0,477	0,905	0,016	0,788	0,000	0,000	0,002	0,643	0,758	0,266	0,011	0,028	0,154	0,009	0,004	0,025	0,000	0,022	0,391	0,138

Variabilité saisonnière de la qualité Physicochimique

Le tableau 3 indique les résultats du test U de Mann-Whitney (valeurs de p) appliqué pour l'étude des variations saisonnières des paramètres physicochimiques et des différences éventuelles entre la qualité de l'eau du cours principal et ses affluents. La variation de la qualité physicochimique entre les deux campagnes effectuées en saison sèche est statistiquement faible ($p > 0,05$) à l'exception de la Température, des Nitrites, les Matières en Suspension et les éléments métalliques (Fer et Manganèse). Cette variation est faible également pendant les deux campagnes effectuées en saison pluvieuse à l'exception de la température, les Sulfates et les Chlorures qui présentent un $p < 0,05$. Contrairement à la variabilité intrasaisonnière, la variabilité intersaisonnière est significative pour de nombreux paramètres (O₂, Coul, MES, KMn, NO₂, NH₄, PO₄, Fe, Mn et SO₄). La différence entre les eaux du cours principal et les eaux des affluents est significative pour tous les principaux ions majeurs, la transparence, le fer, l'ion orthophosphate et l'oxydabilité au KMnO₄.

Tableau 3 : valeurs de p des tests de Mann-Whitney

	Facteurs			
	intra saisonnière		intersaison	Cours d'eau
	Saison Sèche- Saison Sèche	Saison Pluvieuse- Saison Pluvieuse	Saison Sèche – Saison Pluvieuse	Cours principale- Affluents
T°C	0,002	0,010	0,595	0,147
pH	0,764	0,612	0,182	0,856
Cond	0,697	0,504	0,585	0,000
TDS	0,415	0,644	0,364	0,000
O ₂	0,809	0,314	0,002	0,517
Tran	0,467	0,582	0,828	0,000
MES	0,000	0,878	0,000	0,343
Coul	0,633	0,786	0,000	0,098
KMn	0,088	0,127	0,001	0,000
HCO ₃	0,901	0,415	0,381	0,000
Ca	0,321	0,982	0,948	0,000
Mg	0,103	0,485	0,994	0,000
NO ₂	0,033	0,971	0,029	0,165
NO ₃	0,106	0,059	0,133	0,015
NH ₄	0,820	0,572	0,027	0,095
PO ₄	0,273	0,130	0,006	0,002
Mn	0,041	0,924	0,000	0,063
Fe	0,048	0,741	0,020	0,000
SO ₄	0,936	0,000	0,004	0,011
Cl	0,065	0,011	0,910	0,000
Na	0,562	0,398	0,128	0,000
K	0,150	0,832	0,082	0,000

Analyse en Composante Principale (ACP)

L'ACP est réalisée d'une part avec les échantillons de saison sèche et d'autre part avec ceux de la saison pluvieuse. Les figures 2 et 3 présentent les résultats obtenus. Les paramètres O₂, Tran, KMn, NH₄, MES et la Couleur, montrent une corrélation significative (± 0.6 à ± 0.94) avec l'axe F1 pendant les deux saisons. Ils ont contribué principalement à la construction des axes F1, qui présentent respectivement 42,01% et 37,33% de la variance totale pour la saison sèche et pour la saison des pluies.

Le regroupement et le positionnement des variables dans les cercles de corrélation nous permet de distinguer trois groupes de variables : le groupe 1, caractérisé par des descripteurs de pollution anthropique et le pluvio-lessivage (NH₄, MES, Coul, KMn, PO₄, NO₃, SO₄, Fe, Mn), le groupe 2, caractérisé par les indicateurs de la qualité de l'eau (O₂, Tran, pH) et le groupe 3 caractérisé par les ions majeurs indicateurs du degré de minéralisation (Cl, Na, Ca, Mg, HCO₃, Cond). Dans la figure 2, les indicateurs de la qualité de l'eau s'opposent aux indicateurs de pollution anthropique sur les axes F1. Ainsi, l'axe F1 traduit « le gradient des impacts anthropiques » (sens des flèches en gras fig.3) dans les stations de l'étude.

La projection des stations dans le plan factoriel F1xF2 (Figure 3) montre qu'en saison sèche les stations SF1 à SF10, SA1 et SA2 présentent un gradient d'impact anthropique (pollution) important à l'opposé des stations SF12 à SF19, SF11, SA3 à SA10. En saison des pluies ce sont les stations SF1 à SF11, SA1 et SA2 qui présentent un gradient de pollution plus important à l'opposé des stations SF12 à SF19, SA3 à SA10. Ainsi les stations se répartissent en trois catégories (fig.3) quel que soit la saison.

Certains paramètres ont changé d'axe au cours des deux saisons. Il s'agit de la conductivité, des ions chlorure, sodium et potassium. Ils sont liés à l'axe F1 en saison pluvieuse mais à l'axe F2 en saison sèche, avec un coefficient de corrélation supérieur à 0,75. L'axe F2 correspond donc à la salinisation en saison sèche. Les stations SF1, SF2 et SF3 sont les plus affectés par ce processus. Ces stations sont situées à l'extrême sud-est du bassin proche du Lac Togo (figure 1). Cela suggère des cas de mélange de l'eau de rivière avec l'eau salée, associé à l'évapoconcentration. En saison pluvieuse, les ions NO₃ et SO₄ se sont dissociés de l'axe F1 pour afficher une certaine corrélation avec l'axe F2. L'axe F2 peut donc être désigné par le pluvio-lessivage des sels surfaciques en saison des pluies.

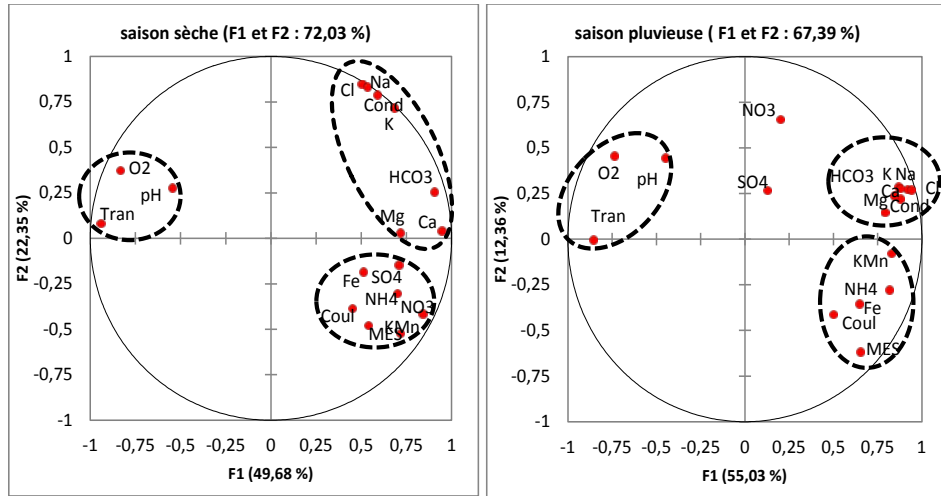


Figure 2: cercle de corrélation des variables physicochimiques en saison sèche et en saison pluvieuse

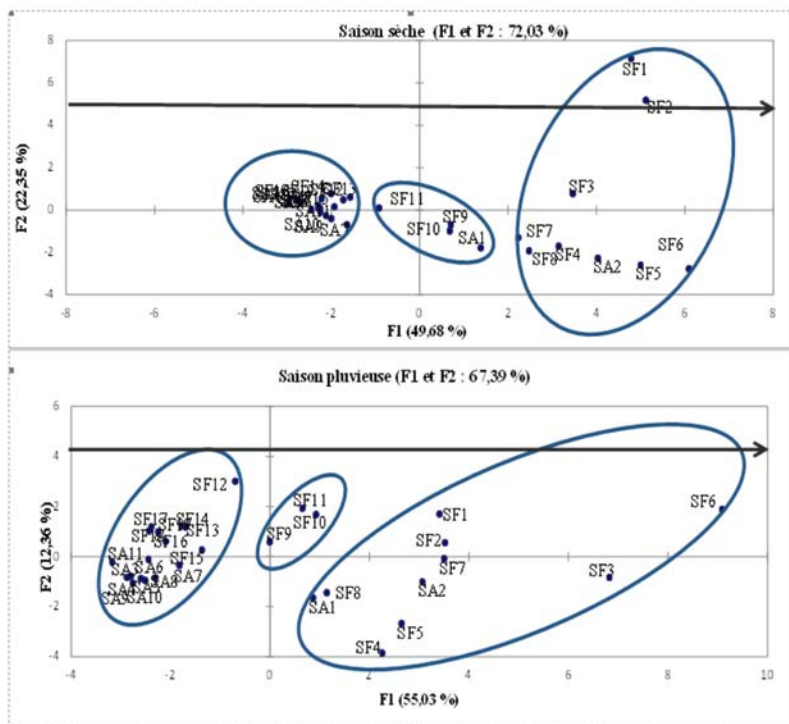


Figure 3: cartes factorielles des stations pendant les saisons sèches et des saisons pluvieuses

Classification hiérarchique Ascendante (ACH) et regroupement des sites

Une classification hiérarchique ascendante effectuée à partir des valeurs moyennes des quatre campagnes a permis de compléter les informations de l'ACP et de classer les sites en trois groupes. Nous

identifications sur figure 4 trois principaux groupes: le groupe 1 : constitué des stations du cours principal de l'aval et des affluents sous fortes pressions anthropiques (SF1 à SF10, SA1 et SA2) ; le groupe 2: les stations du cours principal de l'amont très peu perturbées (SF11 à SF19).et le groupe 3: les stations des affluents de l'amont sous faible pressions anthropiques (SA3 à SA11).

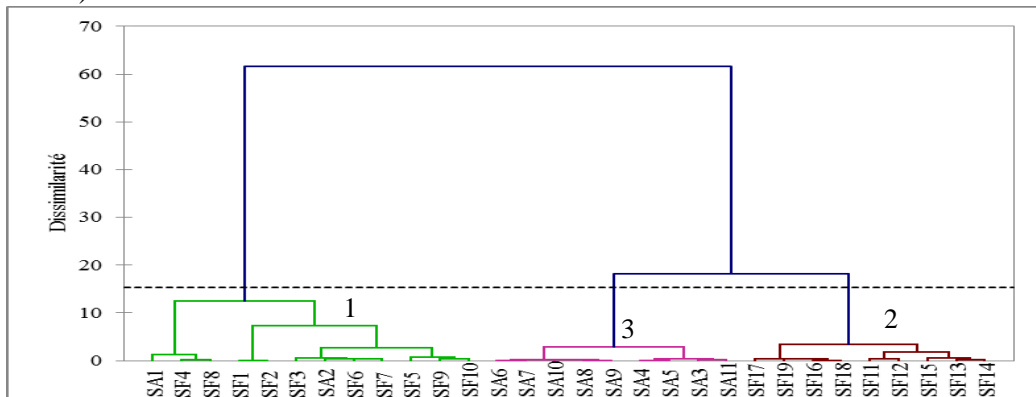


Figure 4: Classification Hiérarchique Ascendante des stations

Variation de la qualité physicochimique dans les groupes de stations de l'ACH pendant les quatre campagnes

Les figures 5a, 5b et 5c ci-dessous montrent la variation de certains paramètres physicochimiques accompagnée du test ANOVA de Kruskal-Wallis pour les trois groupes de stations identifiés par l'ACH. D'une façon générale, le pH et la température ne montrent pas un grand écart de variation entre les trois groupes. Ce pendant les pH acides ne sont enregistrés que dans les groupes 1 et 3 avec la valeur la plus faible 6,34 à la station SF6 dans le groupe 1. En ce qui concerne l'Oxygène dissous, les valeurs plus élevées (proches de la saturation ou sursaturées) sont obtenues dans les stations du groupes 2 ou nous enregistrons jusqu'à 14,6 mgO₂/L dans la station SF17. Les plus faibles valeurs sont obtenues dans les stations du groupe 1 où nous enregistrons parfois des valeurs inférieures à 1 mgO₂/L. Dans l'ensemble pour tous les autres descripteurs physicochimiques, les valeurs les plus élevées sont obtenues dans les stations du groupe 1 alors que les plus faibles sont mesurées soit dans le groupe 2 soit dans le groupe 3. Ce pendant dans tous les groupes nous observons quelques valeurs atypiques ou extrêmes pour certains paramètres physicochimiques. Ces valeurs atypiques ou extrêmes peuvent être imputables à une pollution ponctuelle dans certaines stations, à des activités anthropiques plus intenses dans certaines stations ou d'une façon globale à une différence des impacts divers sur les eaux des stations d'un même groupe. Par ailleurs le test montre à l'exception de la

température, une différence significative ($p < 0,05$) des valeurs des variables physicochimiques dans les trois groupes de station.

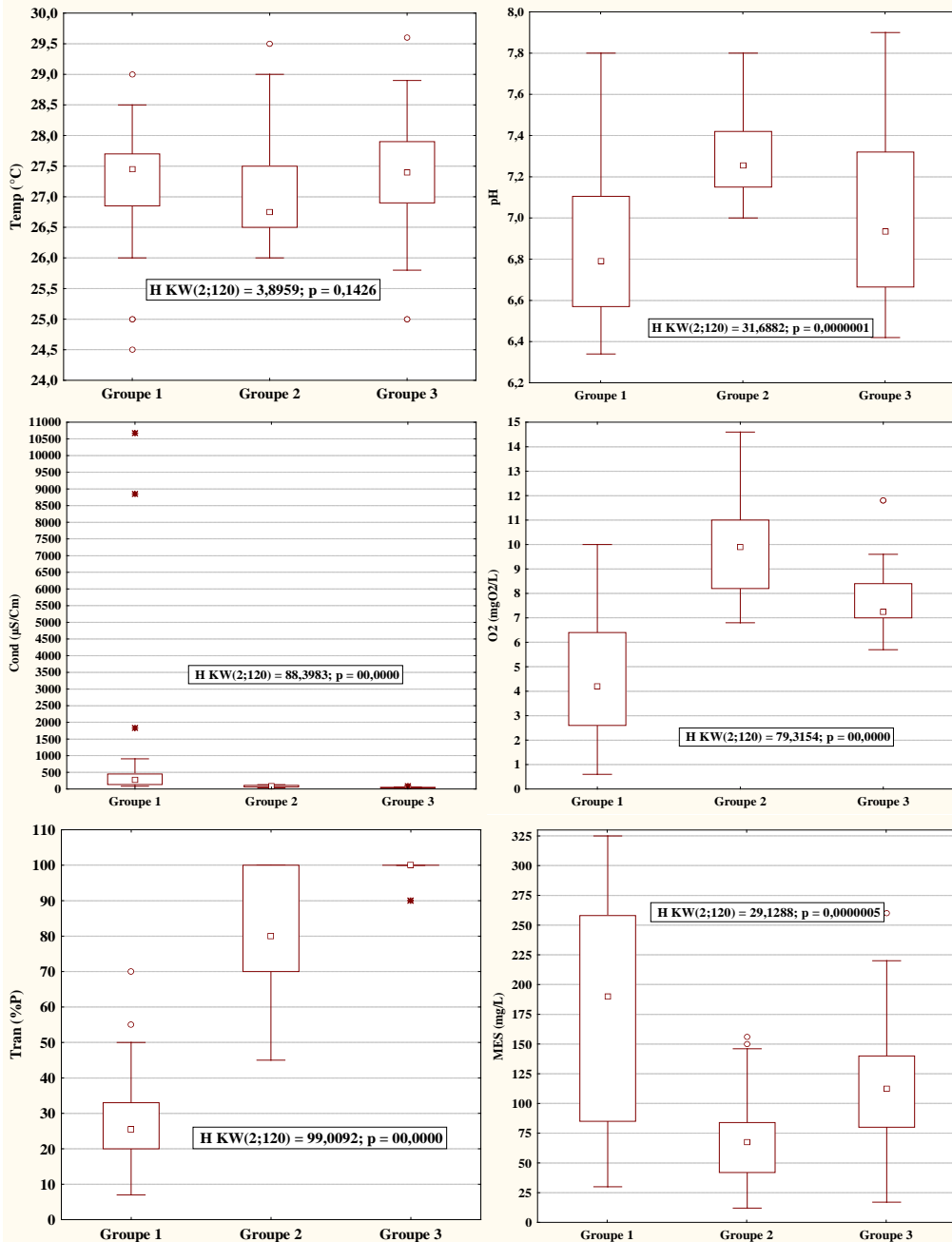


Figure 5a : Variation de la qualité physicochimique dans les groupes de stations de l'ACH

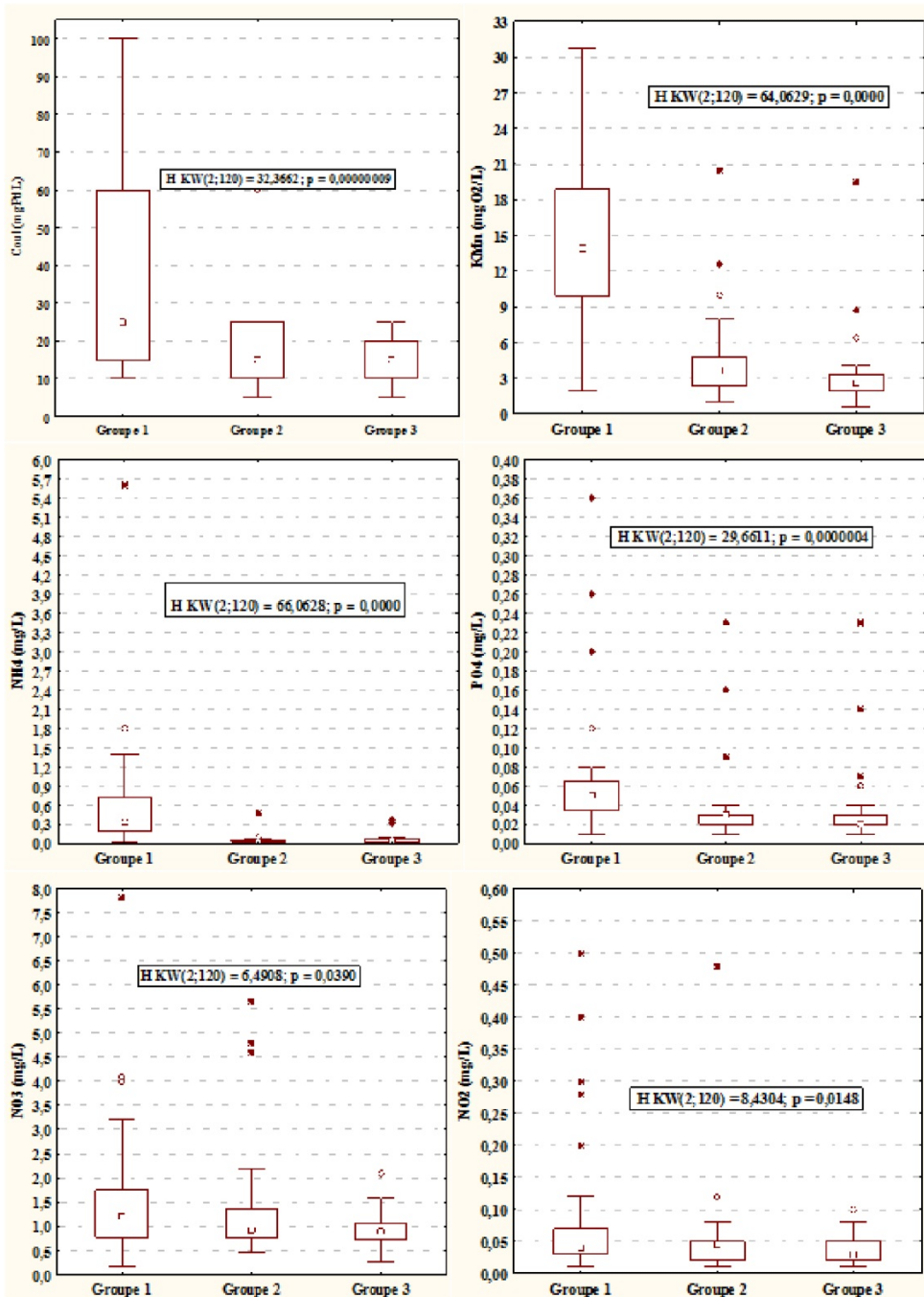


Figure5b: variation de la qualité physicochimique dans les groupes de station de l'ACH

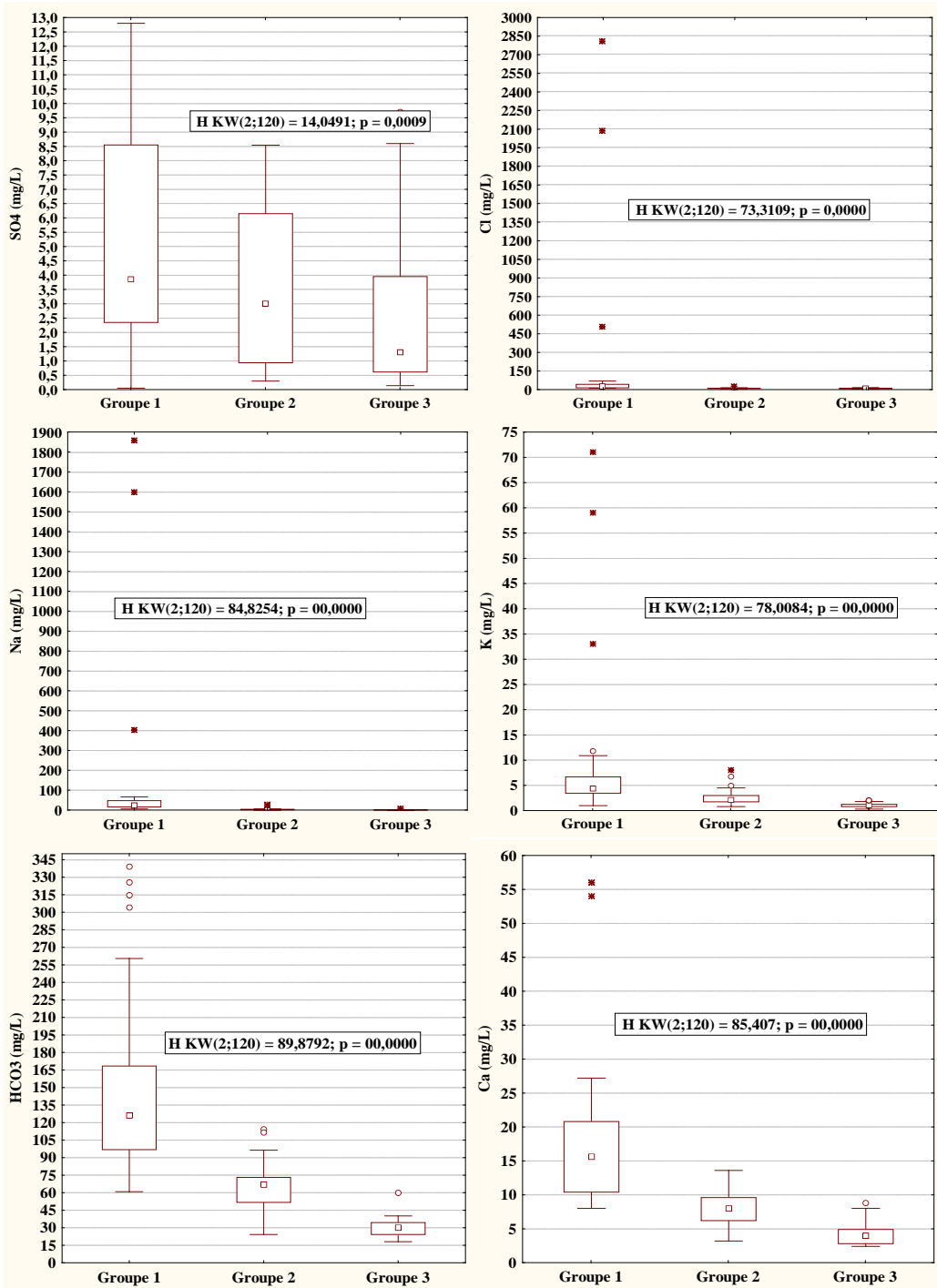


Figure5c: variation de la qualité physicochimique dans les groupes de stations de l'ACH

Facès hydrochimiques et processus de minéralisation des eaux

La figure 6 indique les différents faciès en fonction du régime hydrologique (fig.6a) et en fonction des groupes de stations (fig.6b) dans le diagramme de Piper. La majorité des points (fig.6a) présente un faciès bicarbonatés calcique ; quelques points bicarbonatés sodiques ainsi que trois points chlorurés sodiques dont deux hyperchlorurés sont également observés. A chaque régime hydrologique le faciès bicarbonaté calcique est dominant suivi du faciès bicarbonaté Sodique. Le faciès Chloruré sodique n'est présent qu'en régime des basses eaux et uniquement dans les eaux des stations du groupe 1 situées à l'aval. La répartition spatiale des faciès (fig.6b) montre une certaine particularité entre les trois groupes de stations. En effet le faciès bicarbonaté sodique domine le groupe 1 dans lequel il y a également quelques points chlorurés sodiques ; le faciès bicarbonaté calcique est plus important dans le groupe 2 alors que le groupe 3 seul présente quelques points chlorurés calciques mais avec une prépondérance bicarbonaté calcique. Ainsi les eaux évoluent du faciès bicarbonaté calcique au bicarbonaté sodique et chloruré sodique de l'amont vers l'aval (sens de la flèche).

Les figures 7 indiquent les faciès hydrochimiques des trois groupes de stations à partir des valeurs moyennes des quatre campagnes. Plusieurs axes représentant les teneurs des ions montrent un certain parallélisme dans chaque groupe particulièrement dans le groupe 2 et le groupe 1 ; ce qui laisse penser que les eaux de chaque groupe semble subir la même influence ou le même processus de minéralisation dans le cours principal. Dans les stations des affluents les axes des ions majeurs se recoupent et sont moins parallèles ce qui évoque un processus d'acquisition de ces ions différents dans les affluents. Ainsi l'apport des affluents et le gradient anthropique pourraient expliquer la différence du chimisme des eaux de certaines stations du cours principal surtout celles de l'aval.

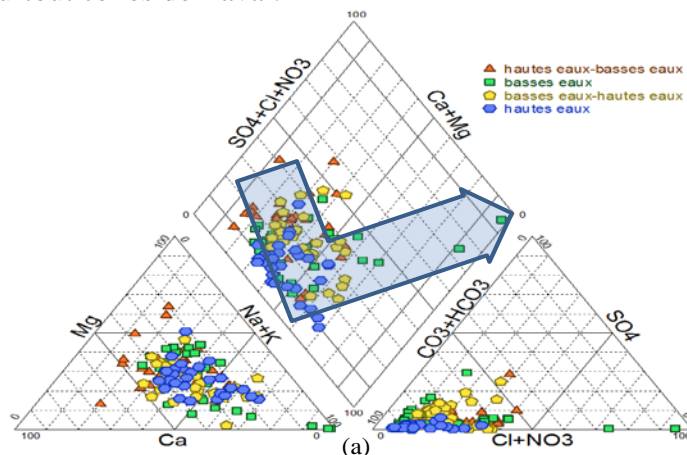


Figure 6a: Diagrammes de Piper montrant les faciès hydrochimiques selon l'hydrologie

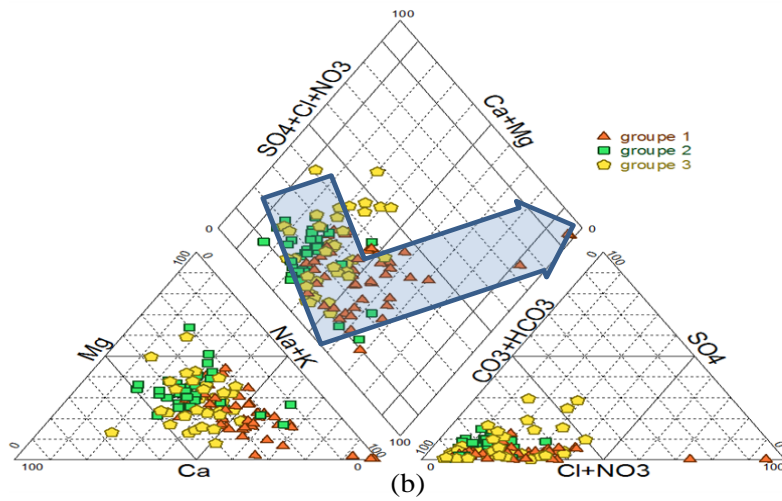


Figure 6b: Diagrammes de Piper montrant les faciès selon les groupes de l'ACH.

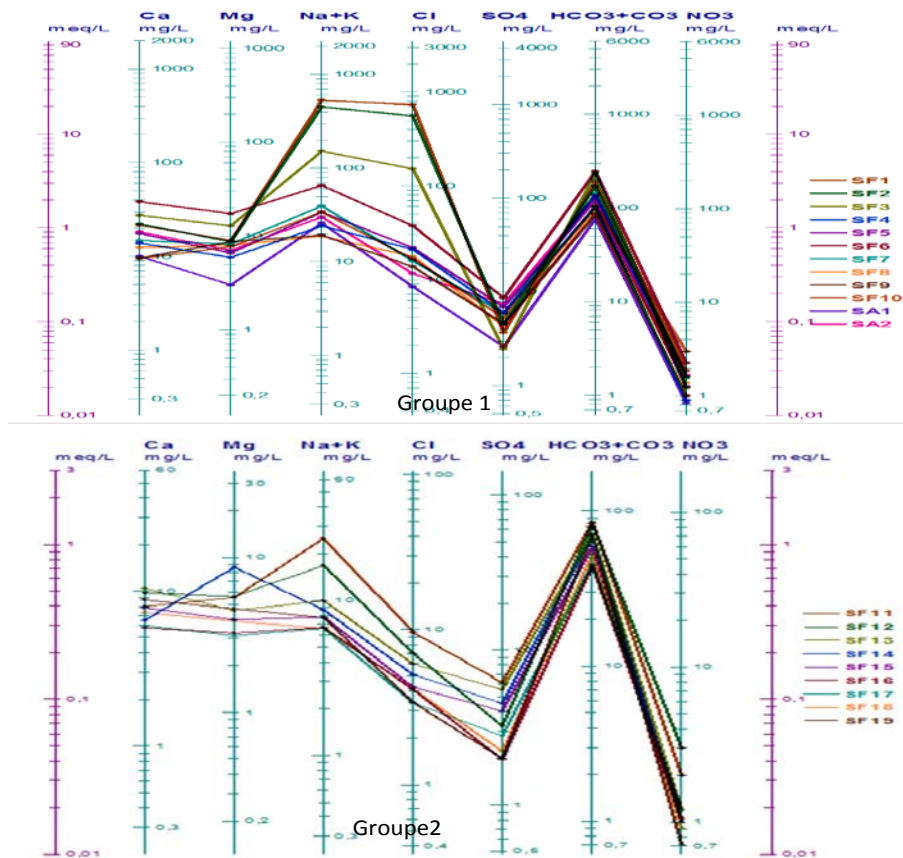


Figure 7a: Diagramme de Schoeller Berkaloff des stations du groupe 1 et 2

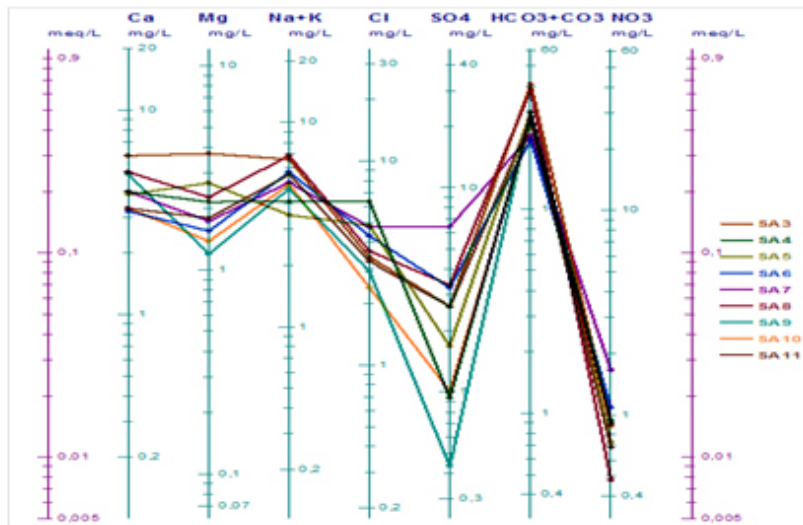


Figure 7b: Diagramme de Schoeller Berkaloff du groupe 3

Discussion

Qualité physicochimique globale des eaux

Les températures moyennes dans les stations oscillent entre 26,60 et 27,50°C avec une température maximale de 29,60. Ces résultats sont similaires à d'autres travaux sur les eaux de surface tels que Lamizana-Diallo et al. (2008) dans les eaux du Massili (27,50°C à 33,50°C) et sont en conformité avec Eblin et al. (2014) qui rapportent, qu'en zone tropicale humide, la température moyenne des eaux est environ 30°C. Les pH des eaux de la présente étude, à l'exception des stations de l'aval et quelques affluents qui ont une tendance acide, sont autour de la neutralité et est conforme avec l'idée de Mounjid et al. (2014) selon laquelle dans la plupart des eaux naturelles, le pH est compris habituellement entre 6 et 8.5. Ces pH sont par ailleurs contraires aux pH acides observés dans les eaux sud côtières ivoiriennes que rapportent Eblin et al. (2014). Ces auteurs soutiennent qu'en zone tropicale humide, cette acidité provient principalement de la décomposition de la matière organique végétale, avec la production de CO₂ dans les premières couches du sol. Cette hypothèse semble expliquer la distribution du pH dans le Zio. En effet les zones aval et quelques affluents de tendance à pH acide sont riches en matières organiques et couvertes de végétation aquatique. A l'amont il y a une absence de la végétation aquatique mais une présence d'une matière organique grossière constituée de feuilles mortes que les macroinvertébrés broyeurs déchiquent et qui s'oxydent plus tard à l'aval. Les conductivités sont relativement faibles dans l'ensemble du bassin et oscillent entre 25,30 (amont) et 10670µS/Cm (aval) et sont en moyenne plus élevées à l'aval. Les fortes conductivités de l'aval

sont liées aux activités anthropiques qui sont diversifiées et intensifiées dans cette zone et y apportent certains ions majeurs. Eblin et al (2013) Rapportent que les activités anthropiques est un phénomène intervenant dans la minéralisation par les apports superficiels. D'autres auteurs soutiennent d'ailleurs cette hypothèse en relatant que l'impact des activités anthropiques sur la qualité de l'eau constitue un problème majeur d'ordre mondial et fait l'objet de plusieurs études (Bricha S. et al., 2007 ; El Asslouj et al., 2007 ; Shahbazi et Esmaeili-Sari, 2009). Les teneurs en ions majeurs présentent une distribution semblable à celle de la conductivité. Ces ions montrent d'ailleurs une corrélation significative avec la conductivité et subissent tout comme cette dernière, l'influence de l'anthropisation, de l'érosion hydrique et du contact eau-roche qui constituent les facteurs prépondérants dans l'évolution de la qualité physicochimique des eaux de surface (LUU et al., 2007 ; Ahoussi et al., 2012a et 2012b; Aké et al., 2012). L'oxygène dissous et la transparence, descripteurs de la qualité des eaux décroissent de l'amont vers l'aval contrairement aux descripteurs de l'anthropisation et du pluvio- lessivage (l'ammonium, les nitrates, les sulfates, l'oxydabilité, la couleur, les matières en suspension) qui croissent de l'amont vers l'aval. Ainsi les deux groupes de paramètres s'opposent diamétralement dans le cercle de corrélation pendant la saison sèche et la saison des pluies. Cette opposition entre l'Oxygène dissous et les descripteurs de la pollution anthropique est rapportée par certains auteurs tels que Khalaf et al. (2009) et Makhoukh et al. (2011). Cette situation s'explique par le fait que les activités anthropiques augmentent les teneurs en matières oxydables et certains ions qui utilisent l'Oxygène au cours de leur processus d'oxydation ou de dégradation. Gouiadia (2008) va dans le même sens en soulignant que l'agriculture entraîne des apports de K^+ , Ca^{2+} , NO_3^- , SO_4^{2-} , et PO_4^{3-} et les rejets des eaux usées des apports de Na^+ , K^+ , NO_3^- , NH_4^+ , Cl^- . L'auteur relate que les activités anthropiques ont une influence non négligeable sur la qualité physicochimique des eaux.

Typologie spatiale de la qualité de l'eau

La typologie mise en évidence par la carte factorielle (ACP) et l'ACH est liée aux apports d'éléments minéraux ou organiques par les activités anthropiques d'intensité variable selon les stations auxquels s'ajoute un processus naturel de minéralisation liée au contact eau-roche et aux phénomènes de pluvio- lessivage. En effet les stations sous forte influence anthropique enregistrent les plus fortes conductivités et de teneurs en ions majeurs. Ce sont des stations du cours principal situées à l'aval (SF1 à SF8) et des affluents (SA1 et SA2) qui traversent de nombreuses agglomérations dont elles reçoivent des rejets de toutes sortes et subissent d'autres pressions anthropiques. D'ailleurs l'effet anthropique sur ces stations se remarque par

leurs teneurs élevées des descripteurs de l'anthropisation (ammonium, sulfates, matières en suspension, chlorures, sodium, potassium) comme le soulignent Mary (1999) et Gouiadia (2008) respectivement en Nouvelle Calédonie et en Algérie. Par ailleurs, les faibles transparences et faibles taux d'Oxygène dissous sont aussi un témoin de l'eutrophisation élevée dans ces stations (Rodier et al., 2009).

Par contre les stations sous faible influence anthropiques (SF12 à SF19 et SA3 à SA11) enregistrent les plus faibles conductivités et teneurs en ions majeurs contrairement à l'oxygène dissous et la transparence qui présentent leurs valeurs maximales dans ces stations. Cette situation est liée au fait que ces stations soit situées à l'amont du bassin où il y a peu de pressions anthropiques et surtout moins de rejets qui sont souvent à l'origine de la présence des matières en suspension et des matières organiques oxydables. L'absence ou une faible influence de trois phénomènes (anthropisation, pluvio-lessivage des sols et l'hydrolyse acide des minéraux de la roche au contact eau-roche) peut expliquer la faible minéralisation des eaux de ces stations.

Les stations à pollution modérée ou variable sont moins importantes et situées dans le cours principal (SF9, SF10, SF11). Elles présentent des conditions physicochimiques intermédiaires entre l'amont et l'aval. Les teneurs modérées des paramètres physicochimiques dans ces stations sont imputables au renouvellement de ces eaux par celles de l'amont après les activités ponctuelles ou permanentes.

Variation temporelle de la qualité des eaux

Les teneurs les plus élevées en ions Chlorures, Sodium, Potassium et en Sulfates sont obtenues pendant les basses eaux. Cette situation est liée à l'intensité de l'évaporation des eaux et l'intrusion marine (par apport de Cl, Na, K) en cette période qui entraîne une concentration de ces ions en l'absence d'un renouvellement des eaux. Mary (1999) relate également ces concentrations élevées pendant l'étiage dans les eaux des rivières calédoniennes et explique le phénomène par la baisse du niveau d'eau qui concentre les composantes chimiques en cette période. Par ailleurs les faibles teneurs d'Oxygène dissous et les fortes teneurs en nutriments (NH_4^+ , NO_2^- , PO_4^{3-}) et en matières oxydables sont imputables aux activités d'irrigation, de maraichage, baignade, des rejets intenses en cette période le long du cours d'eau alors que la capacité de renouvellement des eaux est limitée par les faibles vitesses et l'absence des pluies.

Conclusion

L'étude hydrochimique des eaux du bassin du Zio montre des eaux de faible à forte minéralisation de l'amont vers l'aval du bassin ($25.88 \mu\text{S}/\text{Cm} \leq$

conductivité moyenne $\leq 2936.25 \mu\text{S}/\text{Cm}$). Les eaux sont très douces dans l'ensemble à l'exception des trois stations proches du Lac Togo qui subissent une intrusion marine en étiage. Ainsi, les eaux sont à dominance Bicarbonaté calcique à l'amont avec des points bicarbonatés sodiques et chlorurés sodiques majoritaire à l'aval. La qualité physicochimique est dégradée dans les stations du cours inférieur avec des teneurs élevées en chlorures, sodium, ammonium, matières Oxydables et matières en suspension. Les méthodes d'analyses multivariées ont montré que la qualité des eaux du bassin est gouvernée par quatre phénomènes majeurs : les activités anthropiques, le pluvio-lessivage des sols, l'hydrolyse des minéraux de la roche et l'intrusion marine.

References:

- S. Haouchine, (2011). Recherche sur la qualité faunistique et l'écologie des macroinvertébrés benthiques des cours d'eau de Kabylie, mém. Magister sciences bio.
- M. S Foto, T. S. H Zebaze, T. N. L Nyamsi, G. A. Ajeagah et T.Njiné, (2011). Evolution Spatiale de la Diversité des Peuplements de Macroinvertébrés Benthiques dans un cours d'eau Anthropisé en Milieu Tropical (Cameroun) European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X Vol.55 No.2, pp.291-300
- A.B. Dixon, A.P Wood, (2003).Wetland cultivation and hydrological management in Eastern Africa: Matching community and hydrological needs through sustainable wetland use. Natural resources forum 27, 117–129
- M.C Acreman, G.E.Hollis, (1996).Water management and wetlands in sub-Saharan Africa,
- M. Everard & A.Powell. (2002). Rivers as living systems.Aq.Cons.Mar. Freshwat. Ecosyst.,12 329-337
- B. Pieter, T. M. Seid, D. M. Luc, L.M. G. Peter, (2013). Development of a multimetric index based on benthic macroinvertebrates for the assessment of natural wetlands in Southwest Ethiopia. ESELVIER Ecological Indicators 29, 510–521
- AFNOR, 1997. Qualité de l'eau. Recueil des Normes Françaises Environnement. Tomes 1, 2, 3 et 4. 1372 p.
- M.L Belghiti., A. Chahlaoui, A. Bengoumi, (2013). Caractéristiques physico-chimique des eaux de certains puits utilisés comme source d'eau potable en milieu rural dans la région de Meknès (Maroc), Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°14, Juin, 21-36.
- D. Lamri, D. Belghyti. (2011). Bio-évaluation de la qualité des eaux par application des indices biotiques : Cas de l'Oued Moulouya (Maroc). ScienceLib Editions Mersenne : Vol. 3, N ° 110905, ISSN 2111-4706

- M. Makhoukh, M. Sbaa, A. Berrahou , M. Van. Clooster, (2011). Contribution à l'étude physico-chimique des eaux superficielles de l'oued moulouya (maroc oriental), Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 09, pp. 149-169.
- M. El Morhit, M. Fekhaoui, A. Serghini, S. El Blidi, A. El Abidi, R. Bennaakam, A. Yahyaoui, M. Jbilou (2008). Impact de l'aménagement hydraulique sur la qualité des eaux et des sédiments de l'estuaire du Loukkos (côte atlantique, Maroc). Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre, N° 30 39-47.
- M. B. Lamizana-Diallo, S. Kenfack, J. Millogo-Rasolodimby, (2008). Evaluation de la qualité physico-chimique de l'eau d'un cours d'eau temporaire du Burkina Faso – Le cas du Massili dans le Kadiogo. Sud Sciences et Technologie ISSN 0796-5419
- S. G. Eblin, A. P. G. Sombo soro , N.AKA, O.MBIRÉ, N.ORO, (2014). Hydrochimie des eaux de surface de la région d'Adiaké (sud-est côtier de la Côte d'Ivoire). Journal of Applied Biosciences 75:6259– 6271 ISSN 1997–5902
- J. Mounjid, N. Cohen, S. Fadlaoui, A. Belhouari, S. Oubraim, (2014). Contribution à l'évaluation de la qualité physico-chimique du cours d'eau merzeg (periurbain de Casablanca, maroc). Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°18 pp. 31-51
- S. Bricha, K. Ounine, S. Oulkheir, N. EL Haloui, B. Attarassi, (2007). Étude de la qualité physicochimique de la nappe phréatique M'nasra (Maroc). Afrique SCIENCE 03 (3); pp 391-404.
- J. El Asslouj, S. Kholtei, N. El Amrani-Paaza, A. Hilali. (2007). Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines de la communauté Mzamza (Chaouia, Maroc). Revue des sciences de l'eau, vol. 20, n° 3 p. 309-321
- A. Shahbazi and A. Esmaili-Sari. (2009). Groundwater Quality Assessment in North of Iran: A Case Study of the Mazandaran Province. World Applied Sciences Journal 5 (Special Issue for Environment): 92-97.
- T. N. M. Luu, D. Orange, T. H. Dang, A. Le Lan, J. Garnier. (2007). Impact des activités anthropiques sur les flux des matières en suspension et sur la qualité des eaux du fleuve Rouge à l'entrée du delta. Université Pierre et Marie-Curie ; Isyphe. Institut de Recherche pour le Développement (IRD)
- K. E. Ahoussi, Y. B. Koffi, A. M. Kouassi, G. Soro, N. Soro, J. Biémi. (2012a). Étude des caractéristiques chimiques et microbiologiques des ressources en eau du bassin versant du N'zi : cas de la commune de N'zianouan (Sud de la Côte d'Ivoire). International Journal of Biological and Chemical Sciences, 6(4): 1854-1873.
- K. E. Ahoussi, Y. B. Koffi, A. M. Kouassi, G. Soro, N. Soro, J. Biemi. Caractérisation Physico- Chimique et Bactériologique des Ressources en eau

des Localités Situées Aux Abords de la lagune Ébrié dans la commune de Marcory (District d'Abidjan, Côte Ivoire) : cas du village d'Abia Koumassi. *European Journal of Scientific Research*, Vol. 89 No 3 (2012b): 359-383.

G. E. Aké, B. H. Kouadio, M. G. Adja, J-B. Ettien, K. R. Effebe, J. Biemi. (2012). « Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique des sols de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) », Volume 6: <http://physiogeo.revues.org>.

G. Khalaf, K. Slim, C. Abi-Ghanem, K. Nakhlé et M. Fakhri, (2009). Caractérisation et corrélation des paramètres biotiques et abiotiques des eaux du nahr el bared. *Lebanese Science Journal*, Vol. 10, No. 1,

L. Gouaidia, influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physicochimiques des eaux d'une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de meskiana nord-est algerien. Thèse de doctorat hydrogéologie (2008)

N. Mary, (1999). caractérisations physico-chimique et biologique des cours d'eau de la Nouvelle-Calédonie, proposition d'un indice biotique fonde sur l'étude des macroinvertébrés benthiques, thèse de doctorat, univ du Pacifique

J. Rodier, (2009). *L'Analyse de l'eau*, 9e édition entièrement mise à jour