ISSN 1813-3290, http://www.revist.ci

DYNAMIQUE SAISONNIÈRE DE LA QUALITÉ PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DE SURFACE DANS LE BASSIN DE L'OUÉMÉ À L'EXUTOIRE DE BETEROU

Arsène J. S. AKOGNONGBE[1*], Daouda MAMA[2], Expédit W. VISSIN[1] et Michel BOKO[1]

[1]Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE) ; Université d'Abomey-Calavi (Bénin). BP 1338, Abomey-Calavi, République du Bénin
[2]Laboratoire d'Hydrologie Appliquée à la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université d'Abomey-Calavi (LHA / FAST / UAC)
01 BP 4521 Cotonou (Bénin)

* Correspondance, e-mail : *arsene.akognongbe@gmail.com*

RÉSUMÉ

Les ressources en eau de surface sont exploitées à diverses fins dans le bassin de l'Ouémé à Bétérou (Bénin) que ce soit en période humide comme en période sèche. Ainsi, l'étude de la composition chimique des eaux de surface prélevées au cours des deux campagnes (septembre 2012 et avril 2013) sur quatorze stations du bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou montre que les eaux échantillonnées en amont du bassin sont faiblement minéralisées contrairement à celles mesurées en aval du bassin qui se trouvent fortement minéralisées. En effet, l'évolution des éléments chimiques a montré la dominance des ions salifères ((Na+, Cl^-) et des ions gypsifères (Ca^{2+}, $SO4^{2-}$) par rapport à ceux carbonatés (Ca^{2+}, HCO^{3-}) dans l'acquisition de la salinité dans le bassin. Ce bilan a également mis en évidence le phénomène d'échange de base entre les eaux de surface et les passages argileux, ce dernier a été révélé par l'augmentation des teneurs en Na^+ par rapport à Cl^- au cours des deux campagnes.

Aussi, la présence de quatre faciès chimiques obtenus marque ainsi l'hétérogénéité de la lithologie. En effet, on peut citer le faciès bicarbonaté calcique et magnésienne caractérisant les eaux provenant des bordures calcaires, les faciès carbonaté sodique et potassique résultant des formations évaporitiques et enfin les faciès carbonaté surtout dans la partie nord-ouest du bassin. La répartition spatiale des éléments chimiques a confirmé que l'origine de ces faciès est fortement liée à la nature lithologique des eaux.

La dissolution des formations carbonatées et évaporitiques est à l'origine de cette distribution.

Mots-clés : *Bétérou, bassin, eau de surface, faciès chimique, pollution.*

ABSTRACT

Seasonal dynamics of physical and chemical quality of surface water basin Oueme to Beterou

The surface water resources are exploited for various purposes in the basin Ouémé to Bétérou whether wet period as during the dry season. Thus, the study of the chemical composition of surface water collected during two campaigns (September 2012 and April 2013) of the fourteen stations of the basin at the outlet of Ouémé Bétérou shows that the water sampled upstream basin are weakly mineralized unlike those measured downstream of the basin are highly mineralized. Indeed, the evolution of chemical elements showed the dominance of licks ions (Na+, Cl-) and gypsiferous ions (Ca2+, SO42-) versus carbonate (Ca2+, HCO3-) in the acquisition of salinity in the basin. This review also highlighted the phenomenon of base exchange between surface water and clay passages, it was revealed by the increased levels of Na versus Cl- in the two campaigns.

Also, the presence of four chemical facies marks obtained and the heterogeneity of the lithology. Indeed, one can cite the calcium and magnesium bicarbonate facies characterizing water from limestone borders, sodium and potassium carbonate facies resulting from evaporite formations and finally carbonate facies mainly in the northwestern part of the basin. The spatial distribution of chemical elements confirmed that the origin of these facies is strongly related to lithology water. The dissolution of carbonate and evaporite formations is at the origin of this distribution.

Keywords : *Bétérou, basin, surface water, chemical facies pollution.*

I - INTRODUCTION

Les ressources en eau sont sous la pression croissante de l'essor démographique, de l'activité économique et de la concurrence grandissante pour l'eau entre les différents utilisateurs. Les conséquences de la variabilité climatique sur la qualité de l'eau dans les rivières sont assez variables : elle pourrait s'améliorer ou se détériorer suivant l'augmentation ou la diminution du débit de la rivière. Ainsi, le réchauffement climatique peut toutefois entraîner une tendance générale sur la qualité de l'eau.

Un deuxième aspect de la diminution de la qualité de l'eau lié à sa rareté croissante est le fait que les contaminants ou polluants éventuellement présents dans l'eau sont moins dilués, donc potentiellement plus dangereux pour les activités de consommation humaines. Ensuite, en particulier dans les zones urbaines se pose le problème des contaminations d'origine industrielle des rivières, des lacs, des zones humides ou des zones côtières. Enfin, plus directement, la baisse de la qualité de l'eau est susceptible de provoquer des épidémies de choléra ou de diarrhées, comme cela a déjà été le cas par le passé.

Aussi, le rejet dans le fleuve des eaux usées produites par les grandes agglomérations et l'usage de plus en plus croissant des intrants agricoles contribuent dangereusement à la dégradation de la qualité des eaux. Par ailleurs, le nombre d'études d'impact portant sur la qualité de l'eau progresse aussi, même si elles restent rares. L'essentiel des études sur la qualité des cours d'eau s'arrête aux substances dissoutes (nutriments, parfois carbone organique et oxygène [1, 2], et les processus biologiques sont surtout abordés dans des lacs [3, 4]. En effet, dans la zone du socle cristallin, où se situe le secteur d'étude, les conditions hydrogéologiques sont très peu favorables et amènent à recourir dans la majeure partie des cas aux eaux de surface que ce soit pour l'approvisionnement des populations et pour toutes les autres formes d'usages de la ressource.

En effet, le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou n'est pas épargné des effets de l'action anthropique. Il est soumis à une forte vulnérabilité liée à la pollution de plus en plus grandissante de ces eaux superficielles et souterraines. Ainsi, les principales formes de pollution enregistrées sont essentiellement dues à la culture de coton pour laquelle d'importantes quantités d'engrais et de pesticides sont utilisées. L'usage abusif de ces intrants agricoles et parfois même en dehors de leur zone de destination conduit à leur accumulation dans les divers horizons du sol. Il s'ajoute également les risques résultant de la mauvaise gestion des eaux usées et résidus urbains ainsi que ceux liés aux industries (usine d'égrenage de coton, industrie textile). Les populations riveraines ne possèdent pas à elles toutes des latrines, ce qui les amène à déféquer à ciel ouvert. Aussi, est-il évident que le chimisme des eaux de surface et des eaux souterraines dépend, principalement, de la composition lithologique des couches traversées et du temps de séjour des eaux. Cette interaction influe sur la teneur des éléments majeurs (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, Cl^{-}, $SO4^{2-}$, HCO^{3-} …..). Les concentrations de ces éléments naturels sont conditionnées par divers facteurs tels que les paramètres climatiques, l'activité anthropique, les échanges entre aquifères et les eaux de surface

Les activités anthropiques ont une influence non négligeable sur la qualité physicochimique non seulement des eaux de surface mais aussi des eaux souterraines. Ainsi, s'observent principalement deux types d'influence :

- en agriculture : apports de K+, Ca^{2+}, NO_3-, $SO4^{2-}$, NH^{4+} et $PO4^{3-}$;
- rejets des eaux usées : apports de Na+, K+, NO_3^-, Cl^- et quelques métaux lourds ;

Le bassin de l'Ouémé à Bétérou est compris entre 9° 12' latitude nord et 2° 16' longitude est comme l'indique la ***Figure 1***. Il est sous l'influence d'un climat tropical soudanien avec une saison sèche de mi-octobre à avril et une saison pluvieuse de mai à octobre. La pluviométrie annuelle moyenne est de 1130 mm **[5]**. Le bassin-versant de l'Ouémé à Bétérou se caractérise, dans son ensemble, par un relief peu accidenté. Il montre cependant, du sud au nord, plusieurs types de milieux physiques, principalement commandés par un gradient climatique méridien, légèrement modéré par l'altitude.

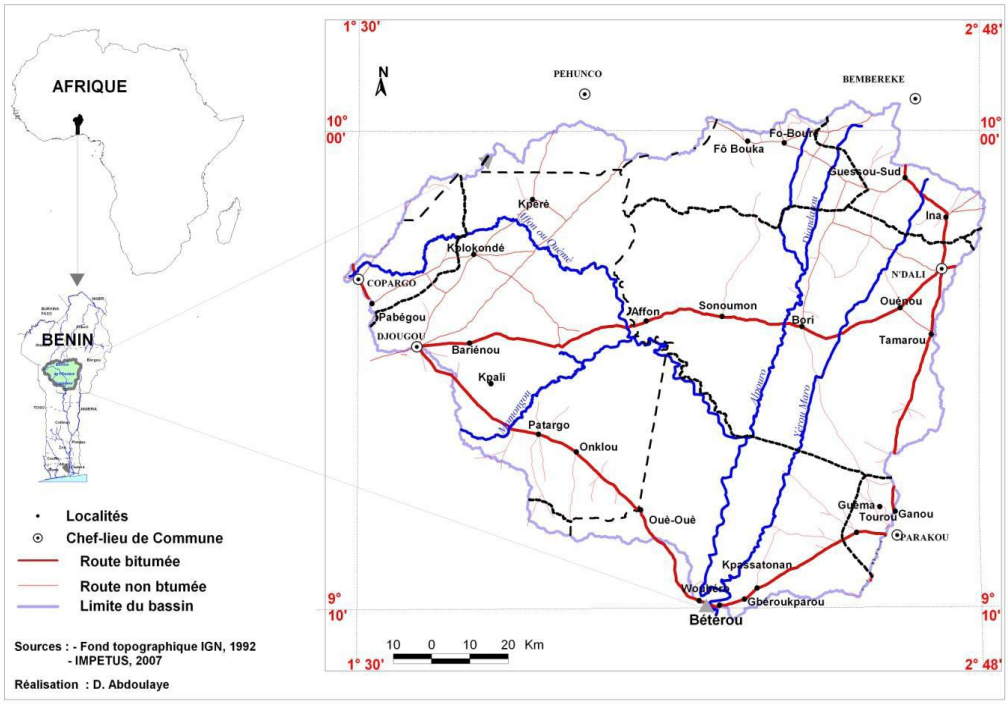

Figure 1 : *Présentation du bassin de l'Ouémé à Bétérou*

II - DONNÉES ET MÉTHODES

II-1. Données utilisées

Ces données sont relatives aux mesures des paramètres physicochimiques sur le bassin. Ces données ont été collectées sur deux campagnes. Une première campagne effectuée en période humide (Septembre 2012) et une autre en période sèche (Mars 2013). En effet, les données physicochimiques collectées sur les deux campagnes ont servis à une comparaison de l'évolution/dynamique de ces données que ce soit en période sèche qu'en période humide sur le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou.

II-2. Échantillonnage

La méthode d'échantillonnage utilisée a consisté à inventorier tous les postes où il sera procéder aux différentes analyses concernant les paramètres physico-chimiques, etc. Pour cela, il a été choisi quatorze (14) sous-bassins sur le secteur d'étude sur la base des cartes de la dynamique d'occupation du sol sur la bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou sur les années 1978, 1998 et 2010. Ainsi, les prélèvements d'eau sont effectués sur des sites où l'interaction entre les éléments physique et humain, peuvent influer sur la qualité physico-chimique des eaux consommées. Ces sites sont donc des sites où s'observe une forte concentration humaine et par conséquent une pression élevée sur les ressources en eau de surface du secteur d'étude. La répartition spatiale des sites de prélèvements retenus à l'issue de cette comparaison des cartes d'occupation de sol sont présentés par la ***Figure 2***.

II-3. Campagne de prélèvement et transport des échantillons d'eau

Les prélèvements ont été effectués par point d'eau. Les eaux sont prélevées au moyen des bouteilles en plastique des eaux minérales de capacité 1,5L pour les analyses physico-chimiques du lieu de prélèvement au laboratoire d'analyse. Ainsi, dans le but d'éviter tout contact avec l'air, les bouteilles sont hermétiquement fermée et bandée avec du ruban adhésif. Aussi, chaque bouteille ou flacon est rincé par l'eau qu'elle doit contenir. Une fois les prélèvements faits, les flacons ou les bouteilles contenant des échantillons sont régulièrement étiquetés et rangés dans une glacière pour être immédiatement acheminés au laboratoire pour des analyses.

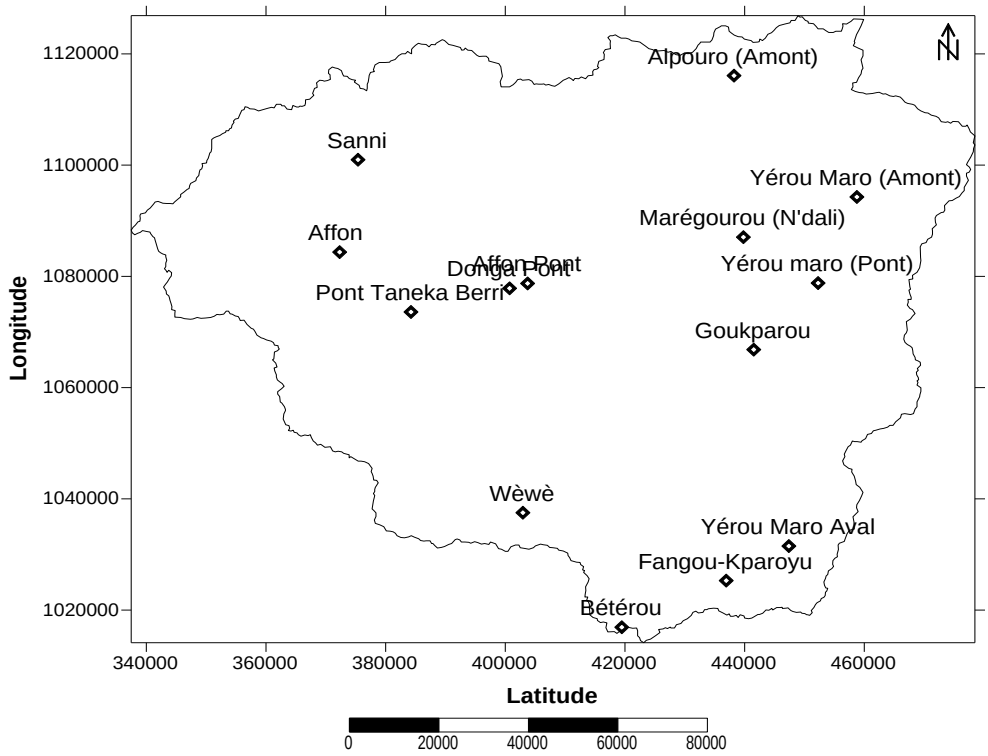

Figure 2 : *Sites de prélèvement sur le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou*

Le critère de stratification choisi concerne la taille des villages, la densité de population, le nombre d'infrastructures hydrauliques par villages.

II-4. Méthode de traitement des données

L'analyse des données a consisté ici à la caractérisation hydrochimique du bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou sur les données des campagnes de 2012 et 2013 à travers l'analyse des paramètres physico-chimiques, mesurées aux différentes stations échantillonnées. La qualité des eaux de surface du bassin est étudiée à travers la variation de quelques paramètres physico-chimiques que sont : la température, le potentiel Hydrogène (pH), la Conductivité, les ions Calcium (Ca^{2+}), Magnésium (Mg^{2+}), Sodium (Na+), Potassium (K+), Bicarbonate (HCO_3^-), Chlorure (Cl^-), Sulfate ($SO4_2^-$), Nitrate (NO_3^-). La mesure de la température, du potentiel Hydrogène (pH) et de la conductivité électrique est faite a l'aide d'un multi paramètre portatif (Consort, type C835). Quant à la détermination des nitrates (NO_3^-) et sulfates ($SO4_2^-$), elle a nécessite le dosage colorimétrique a l'aide d'un spectrophotomètre (UV/visible Lamba 2).

Le sodium (Na+) et le potassium (K+) sont déterminés par excitation des atomes par le photomètre à flamme variant. Les valeurs mesurées et analysées sont comparées à la Concentration Maximale Admise (CMA) au-delà de laquelle l'eau est qualifiée de polluée **[6]** et nuisible a l'organisme humain. Ces paramètres sont couplés à l'observation et à l'identification des indicateurs de la dynamique des écosystèmes. Ces indicateurs considérés comme la résultante des influences interactives entre les éléments du milieu naturels et les facteurs humains ont été combinés et utilisés pour comprendre la source de la pollution des eaux souterraines dans le bassin. Dans un deuxième temps, il a été procédé à la représentation sous forme de diagramme de Piper en vue de compléter la caractérisation en déterminant le faciès chimique de chaque échantillon.

III - RÉSULTATS ET DISCUSSION

Un réseau d'échantillonnage a été choisi pour permettre d'acquérir des données représentatives sur la variabilité spatiale et temporelle de la qualité des eaux de surface du bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou. Ce réseau se compose de quatorze ensembles de points d'eau et couvre la totalité du bassin de l'amont vers l'aval.

III-1. Description sommaire des paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques analysés pour apprécier la qualité des eaux de puits et de forages dans le secteur d'étude sont affectes des valeurs de la Concentration Maximale Admissible (CMA). Les eaux polluées sont celles dont les paramètres mesurés ont des valeurs supérieures à la CMA **[6]**. Les résultats d'analyse physico-chimique des eaux de surface du bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou, pendant les deux (02) campagnes de collecte sont consignés dans le ***Tableau 1***.

Le ***Tableau 1*** révèle une très grande variabilité des paramètres physico-chimiques que ce soit en période humide comme en période sèche dans le bassin. Ceci témoigne de l'importance du choix des deux campagnes (humide-sèche) effectuées sur le bassin. Ainsi, un accent particulier sera mis sur chacun des éléments physico-chimiques dans le bassin.

Tableau 1 : *Variation des paramètres physico-chimiques des eaux de surface du bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou*

	Période humide			Période sèche			Normes OMS (2008)
Eléments physicochimiques	**Max**	**Min**	**Moy**	**Max**	**Min**	**Moy**	
pH	10,2	7,0	8,7	10,4	7,2	8,9	6,5-8,5
Conductivité	236,6	23,5	138,6	271,0	15,3	125,9	2000
Température	27,4	24,9	26,7	27,4	26,4	27,0	25
K+ (mg/L)	143,6	1,1	31,69	132,0	8,6	44,15	12
NO_3^-(mg/L)	20,2	0,9	7,6	18,5	1,3	6,3	50
SO_4^{2-} (mg/L)	9,0	0,0	2,7	11,0	0,0	2,1	250
Cl^-(mg/L)	21,3	3,6	12,0	23,1	5,3	12,2	250
HCO_3^- (mg/L)	134,2	12,2	70,8	170,8	18,3	73,0	-
Mg^{2+} (mg/L)	6,3	0,5	3,5	16,3	0,0	4,9	50
Na+ (mg/L)	651,0	2,5	238,3	178,0	0,8	289,3	200
Ca^{2+} (mg/L)	160,3	56,1	116,9	16,0	2,4	8,7	400

CMA : Concentration Maximale Admise ;
***Source** : Résultats de traitements de données, septembre 2012 et avril 2013*

III-2. Température et pH

La ***Figure 3*** présente la variation de la température et du pH des eaux de surface dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou sur les deux campagnes.

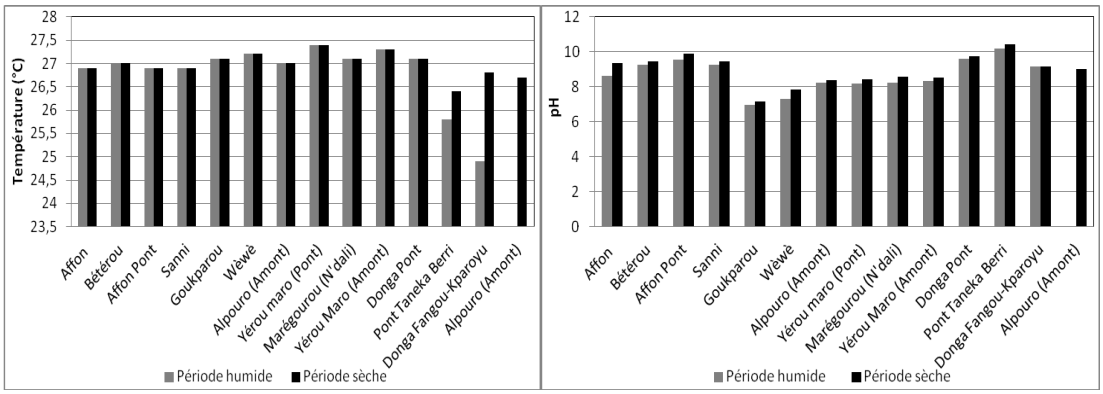

Figure 3 : *Variation de la température et du pH des eaux de surface dans le secteur d'étude*

Les valeurs de températures sont identiques suivant que l'on soit en saison humide comme en saison sèche dans le secteur d'étude. Toutefois, au Pont Taneka Berri, à Donga Fangou-Kparoyu et à Alpouro (Amont), on observe une variation de ces valeurs au cours des deux saisons.
Par ailleurs, les valeurs moyennes de la température sont plus importantes au cours de la période sèche qu'au cours de la période humide. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que ce soit les eaux de surface du bassin qui ont été choisies dans le cadre de cette étude.
Quant au pH, les valeurs mesurées dans les eaux de surface varient très peu et dépassent légèrement les valeurs admises (eaux légèrement acides).

III-3. Conductivité électrique (CE)

Les valeurs de conductivité ont permis de regrouper les eaux du secteur d'étude en 3 classes au lieu des 6 proposées par **[7]**. Le ***Tableau 2*** présente la classification des eaux échantillonnées en fonction de la minéralisation.

Tableau 2 : *Classification des eaux échantillonnées en fonction de la minéralisation*

Conductivité (µs/cm)	**Minéralisation**	**Nombre d'eau de surface échantillonnée**	**Fréquence (%)**
‹ 100	Minéralisation très faible	7	50
[100 – 200]	Minéralisation faible	4	29
[200 – 400]	Peu minéralisée	3	21

***Source** : Résultats de terrain, 2013*

L'analyse du ***Tableau 2*** révèle que 50 % des eaux échantillonnées présentent une minéralisation très faible. Ces eaux concernent les eaux d'Affon, Goukparou, Yérou Maro (Pont), Donga Pont, Pont Taneka Berri, Donga Fangou-Kparoyu et Alpouro (Amont). Aussi, 29 % des eaux échantillonnées présentent une minéralisation faible (Bétérou, Sanni, Wèwè et Marégourou).
Enfin, 21 % présentent des eaux peu minéralisées. Elles concernent les eaux d'Affon Pont, Alpouro (Amont) et Yérou Maro (Amont).

La ***Figure 4*** présente la variation de la conductivité dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou.

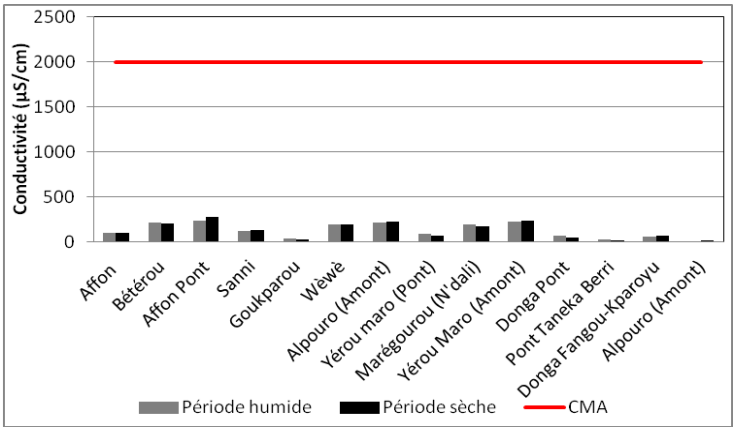

Figure 4 : *Evolution saisonnière de la conductivité électriques des eaux prélevées dans le secteur d'étude*

L'analyse de la ***Figure 4*** révèle que les valeurs de la conductivité électrique mesurées dans le bassin montrent que la plupart des eaux échantillonnées ne dépassent pas la norme recommandée relative à la potabilité des eaux, que ce soit en période humide qu'en période sèche. En effet, les valeurs mesurées varient de 23,5 à 236,6 µS.cm-1 en période humide et 15,3 et 271 µS.cm-1en période sèche. Cela illustre le fait que les écoulements des rivières sont dilués au cours de la période humide correspondant à l'apport des eaux faiblement minéralisées issues essentiellement du ruissellement [8]. Par ailleurs, les valeurs minimales sont enregistrées au nord-ouest (à Taneka Berri source de l'Ouémé) et au centre (Yérou Maro) du bassin tandis que les valeurs maximales ne sont rencontrées qu'à l'amont du bassin (Affon). Ceci pourrait s'expliquer par la forte anthropisation du secteur d'étude (Kolokondé) et aux différentes activités menées par les populations dans cette localité.

III-4. Calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+})

Les ***Figures 5 et 6*** présentent la variation des ions calcium et magnésium dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou.

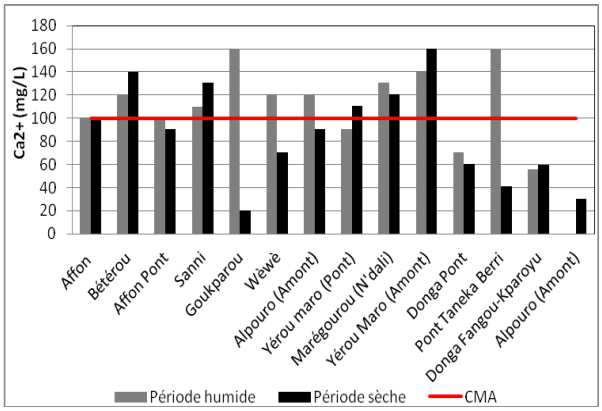

Figure 5 : *Evolution saisonnière des ions calcium dans le secteur d'étude*

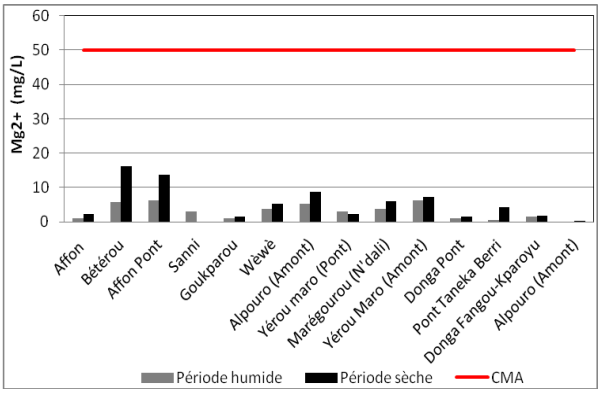

Figure 6 : *Evolution saisonnière du magnésium dans le secteur d'étude*

L'analyse de la ***Figure 5*** révèle que la plupart des eaux échantillonnées présentent des valeurs supérieures à la norme de potabilité des eaux. Pendant la période des hautes eaux, on enregistre une certaine dilution, avec une moyenne de 116,90 mg/L, alors qu'en période des basses eaux la moyenne enregistrée est de 83.25 mg/L. En effet, l'ion calcium a tendance à se concentrer à la surface du sol, ce qui pourrait expliquer les fortes valeurs enregistrées pour cet ion dans le secteur d'étude. Les concentrations relativement plus élevées des ions Ca^{2+} en saison sèche peuvent témoigner de leurs origines lithologiques. Cela se justifie par leur absence quasi-totale dans les eaux de surface et leur variation très peu perceptible entre les deux saisons.

Quant à la ***Figure 6,*** *son analyse* révèle que la moyenne enregistrée pendant la période des hautes eaux (3,47 mg/L) est inférieure à celle des basses eaux (4,92 mg/L), ceci montre l'importance de la dilution par rapport à la concentration pour l'acquisition de cet élément.
Par ailleurs, l'évolution du magnésium est très différente par rapport à celle du (Ca^{2+}), car ce dernier possède de très fortes teneurs provenant de deux origines qui sont mentionnées plus haut.

III-5. Chlorures (Cl^-) et sulfates ($SO4^{2-}$)

Les ***Figures 7*** **et 8** présentent l'évolution saisonnière des ions chlorures et sulfates dans le secteur d'étude.

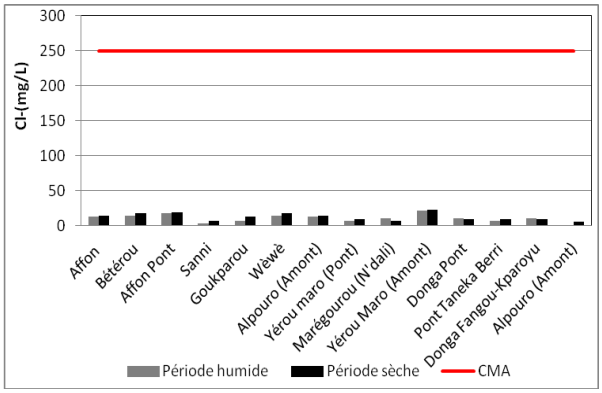

Figure 7 : *Evolution saisonnière du chlorure dans le secteur d'étude*

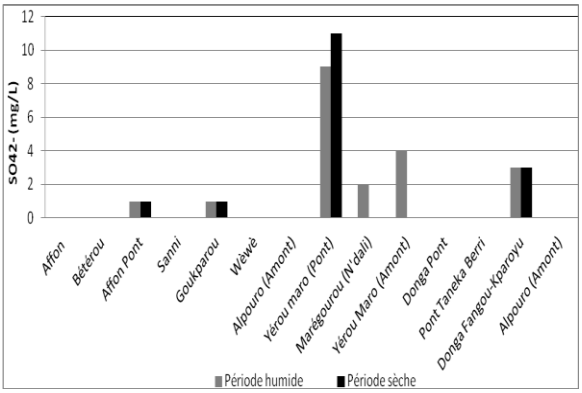

Figure 8 : *Evolution saisonnière du sulfate dans le secteur d'étude*

L'analyse de la ***Figure 7*** révèle que, des teneurs enregistrées, pendant toutes les périodes d'observation (sèche et humide), montrent des valeurs qui sont inférieures à la norme de potabilité de la CMA fixée à 250 mg/L. Toutefois, le rapprochement des valeurs des concentrations durant les deux (02) périodes des hautes eaux et basses eaux met en évidence l'effet du lessivage et de l'évaporation. En effet, la faible teneur des ions Cl^- et NO_3^- dans le bassin malgré la forte minéralisation observée pourrait confirmer l'hypothèse selon laquelle ces eaux proviendraient de compartiments souterrains profonds et ne seraient pas sous influence de la pollution. Par ailleurs, les activités anthropiques contribuent également à l'augmentation des teneurs en chlorures. En effet, le déversement d'eaux usées domestiques, sans qu'elles soient traitées préalablement, nuit à la qualité de ces eaux.

Aussi, l'analyse de la ***Figure 8*** révèle que la totalité des eaux échantillonnées présentent des valeurs qui sont en dessous de la norme de potabilité de la CMA (250 mg/L) de potabilité. Les plus fortes valeurs sont enregistrées pendant la période des basses eaux sous l'effet de l'évaporation, avec un écart type de 4,0472 mg/L, suite au phénomène d'évaporation.

En général la présence de fortes concentrations obéit à deux facteurs :

- ✓ le lessivage des formations gypsifères et les dépôts évaporitiques provenant du secteur d'étude ;
- ✓ l'évaporation, pendant la période des basses eaux, produit de fortes concentrations, ce qui expliquerait que les eaux de la nappe de soient profonde.

Par ailleurs, les sulfates ont aussi pour origine les sulfures (FeS2) qui sont très rares dans le secteur d'étude mais aussi des lessives pratiquées au bord des rivières (***photo 1***) mais aussi des évaporites (gypse : CaSO4) et des sulfures (pyrite : FeS2).

Photo 1 : *Femmes pratiquant la lessive et la vaisselle N'dali*
Cliché : Akognongbé, A. J. S. 2012

Par ailleurs, les plus faibles valeurs sont enregistrées à proximité des bordures, là où les marnes gypseuses sont présentes (elles n'apparaissent qu'au centre et au nord-est du bassin). Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les ions sulfates sont surtout présentent dans la pluie et leur teneur peut atteindre 0,24 mg/L en zone continentale [9].

III-6. Bicarbonates (HCO_3-) et nitrates (NO_3-)

Les ***Figures 9 et 10*** présentent l'évolution saisonnière des ions bicarbonates et nitrates dans le secteur d'étude.

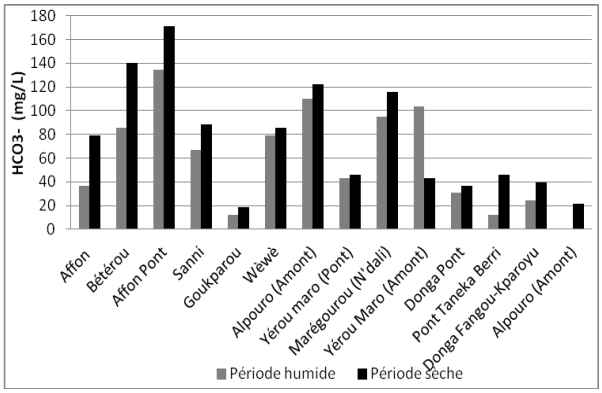

Figure 9 : *Evolution des bicarbonates dans le secteur d'étude*

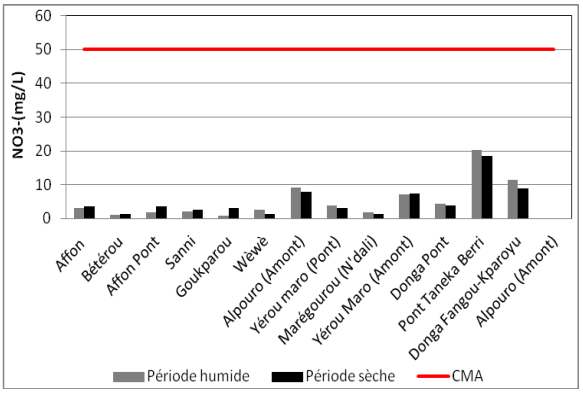

Figure 10 : *Evolution saisonnière des nitrates dans le secteur d'étude*

L'ion HCO_3^- ne présente aucune valeur de référence et est présent dans toutes les eaux à des teneurs variables et considérables. Les localités de Bétérou, Affon pont, Sanni, Wèwè, Marégourou et Yérou Maro (Amont) présentent les plus fortes valeurs en ions bicarbonates dans le secteur d'étude. Par ailleurs, les ions bicarbonates proviennent de l'hydratation du CO2 atmosphérique et interviennent surtout dans la régulation du milieu intérieur et ne sont du tout pas toxiques pour l'homme. Par ailleurs, l'analyse de la ***Figure 10*** révèle qu'aucune des eaux prélevées ne présente des valeurs qui dépassent les normes admises par le CMA (50 mg/l). Ainsi, si les eaux de surface prélevées dans le secteur d'étude ne présentent pas de valeurs supérieures à la norme de potabilité de la CMA, ceci se traduirait aussi par l'absence de contamination des eaux de la nappe dans le secteur d'étude. En effet, si les eaux de surface étaient fortement concentrées en nitrates, l'infiltration de ces eaux de surface et le transfert de polluants vers la nappe phréatique serait évidente.

Ainsi, ces ions ont donc une origine anthropique due à l'utilisation des engrais chimiques dans l'agriculture, comme fertilisants et à la nature lithologique de la couche superficielle ce qui fait augmenter les concentrations des nitrates dans l'eau de surface du bassin. Les rejets des eaux domestiques seraient aussi à l'origine de cette augmentation. Pendant toute la période d'observation, il a été remarqué que la même répartition des concentrations se répète, avec de faibles variations d'une campagne à autre, ce qui s'explique par le fait que les agriculteurs ont les mêmes pratiques et parce que les conditions naturelles (la lithologie et les caractéristiques du climat) sont relativement constantes.

III-7. Potassium (K+)

La ***Figure 11*** présente l'évolution des teneurs du potassium dans le secteur d'étude.

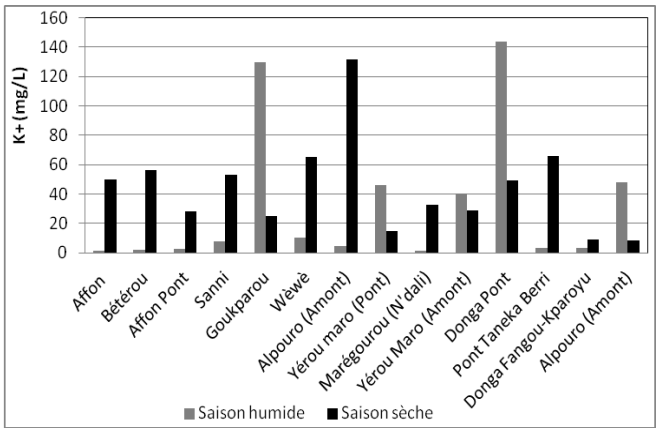

Figure 11 : *Evolution des teneurs du potassium dans le bassin*

En effet, les ions K+ sont peu concentrés dans les eaux souterrainnes. La présence donc des éléments K+ et $S04^{2-}$, qui ont une origine superficielle (car provenant généralement de la décomposition de la matière organique et des engrais chimiques), montre que celui-ci est un indicateur de pollution des eaux de surface. Ainsi, les concentrations en potassium sont assez importantes à Goukparou, Wèwè, Yérou Maro (Pont), Yérou Maro (Amont), Donga Pont. Les fortes teneurs observées au niveau de ces stations peut aussi s'expliquer par le fait que les populations cultivent du tabac au cours de la période sèche au abord des cours d'eau comme l'indique la ***photo 2***.

Photo 2 : Culture du tabac en période sèche dans le bassin de la Donga
Cliché : Akognongbé, A. J. S. 2012

La culture du tabac se fait dans le lit mineur des cours d'eauen période sèche au niveau de certains points. En effet, en période humide, toutes ces cultures sont transportées par les eaux de ruisselleement ce qui augmente la concentration des eaux au niveau de ces points au cours de cette période. Par ailleurs, les ions K+ au même titre que les ions Cl-, NO_3- et $SO4^{2-}$ proviennent en général de la pollution fécale (Cl^-, K+) ou agricole ([8], [9]).

III-8. Détermination des principaux faciès hydrochimiques

Les principaux faciès hydrochimiques déterminés dans les eaux de surface du bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou sont présentés dans le ***Tableau 3***.
Sur toute la période d'observation, il a été remarqué que la répartition des différents faciès dépendait de la lithologie et de l'hydrodynamisme des eaux de surface du bassin. En effet, le faciès bicarbonaté calcique se localise au centre et en bordure du bassin pour les sites de Taneka Berri et Wèwè que ce soit en saison humide comme en saison sèche et tire son origine des formations carbonatées bordant le bassin.

Tableau 3 : *Faciès chimiques des eaux de surface de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou*

Campagnes	Faciès chimiques			
	Bicarbonaté calcique (%)	**Bicarbonaté calcique et magnésienne (%)**	**Carbonaté sodique et potassique (%)**	**Carbonaté sodique (%)**
Septembre 2012	29	29	36	7
Avril 2013	-	57	29	14

Source : *Traitement de données, août, 2013*

Par ailleurs, le faciès carbonaté sodique et potassique se développe au centre du bassin en saison humide comme en saison sèche. Quant au faciès carbonaté sodique, il se développe aussi au centre du bassin. Enfin, le faciès bicarbonaté calcique et magnésienne se développe eu sud-est, au centre et au nord-ouest du bassin. Ceci est du probablement aux apports constitué de formations évaporitiques, et à la présence des marnes emschériennes. Le faciès sulfaté-calcique n'apparaît pas dans l'analyse.

III-8-1. Représentation graphique des faciès hydro-chimiques

L'interprétation des résultats d'analyses hydro-chimiques pour toutes les périodes d'observation a permis d'avoir une idée sur les faciès chimiques des eaux de surface du bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bétérou et leur évolution dans le temps, ainsi que sur les conditions naturelles à l'origine de ces faciès.

III-8-1-1. Campagne de septembre 2012

La ***Figure 12*** présente le diagramme de Piper obtenu pour la campagne de septembre 2012 (correspondant à la saison humide dans le secteur d'étude).

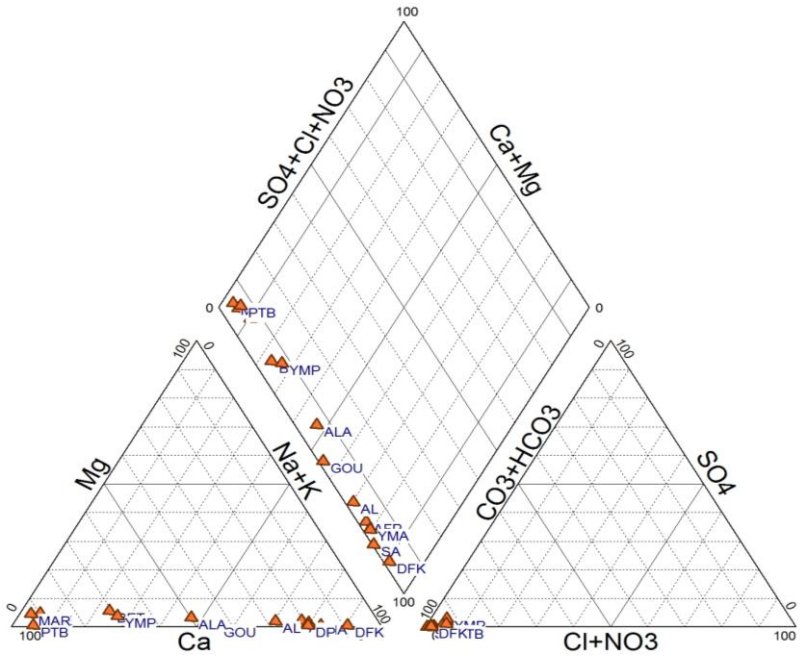

Figure 12 : *Position sur le diagramme de piper, des échantillons prélevés pendant la saison humide dans le secteur d'étude*

L'analyse de la ***Figure 12*** révèle quatre (04) différents faciès pour les eaux de surface échantillonnées en période humide dans le bassin. En effet, s'observent respectivement :

- ✓ le faciès bicarbonaté calcique qui prend en compte les stations de Marégourou (MAR), Wèwè (WE), Pont Tanéka Berri (PTB) et enfin la station de Donga Pont (DP) ;
- ✓ le faciès Bicarbonaté calcique et magnésienne prend en compte quant à lui les stations de Affon (AF), Bétérou (BET), Yérou Maro Pont (YMP) et enfin la station de Alpouro Amont (ALA) ;
- ✓ le faciès sodique prend en compte les stations de Goukparou (GOU), Alpouro (AL), Affon Pont (AFP), Yérou Maro Amont (YMA) et enfin la station de Sanni (SA) ;
- ✓ enfin, le faciès carbonaté sodique prend en compte que la station de Donga Fangou-Kparoyu (DFK).

Par ailleurs, à l'amont du bassin**,** l'ensemble des nuages de points ne présente pas de dominance anionique ou cationique. On signale cependant la présence d'un faciès chloruré calcique, relativement dominant, et un faible pourcentage (15 %) de puits ayant acquis un faciès bicarbonaté calcique dû à l'alimentation par les bordures. La présence de quelques cations sodiques s'explique par les marnes gypsifères qui constituent le substratum du bassin.

On note que les ions ne connaissent pas encore une certaine stabilité à cet endroit, vu les conditions hydrodynamiques de la nappe, et ont une tendance à se concentrer. Le diagramme global confirme la présence des faciès signalés. Les conditions climatiques (les précipitations), la lithologie et les conditions hydrodynamiques (vitesse d'écoulement) ont favorisé le lessivage des couches traversées, ce qui a engendré ces faciès.

III-8-1-2. Campagne d'avril 2013

La ***Figure 13*** présente le diagramme de Piper obtenu pour la campagne d'avril 2013 (correspondant à la saison sèche dans le secteur d'étude).

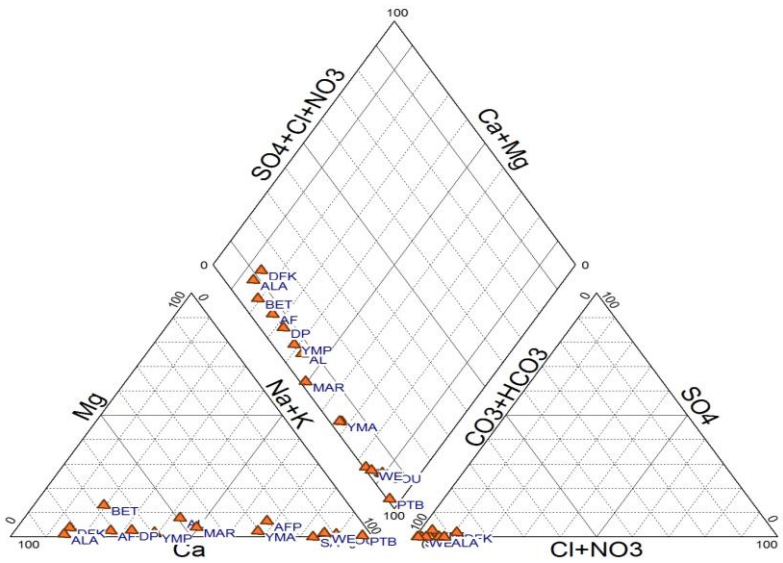

Figure 13 : *Position sur le diagramme de piper, des échantillons prélevés pendant la saison sèche dans le secteur d'étude*

L'analyse de la ***Figure 13*** révèle la présence de trois (03) faciès contrairement aux faciès obtenus en période humide dans le bassin. En effet, ces trois principaux faciès sont entre autres :

✓ le faciès bicarbonaté calcique et magnésienne qui prend en compte les stations de Donga Fangou-Kparoyu (DFK), de Alpouro Amont (ALA), Bétérou (BET), Affon (AF), Donga Pont (DP), Yérou Maro Pont (YMP), Alpouro (AL) et enfin la station de Marégourou (MAR) ;

✓ le faciès carbonaté sodique et potassique qui prend quand à lui les stations de Yérou Maro Amont (YMA), Affon Pont (AFP), Sanni (SA), Wèwè (WE) et enfin la station de Goukparou (GOU) ;

✓ le faciès carbonaté sodique prend en compte que la station de Pont Tanéka Berri (PTB).

Le diagramme global met en relief trois faciès dominants, qui sont bicarbonaté calcique et magnésienne, le carbonaté sodique et potassique et enfin le carbonaté sodique. Le faciès bicarbonaté calcique et magnésienne apparait avec le même pourcentage que les deux autres faciès. Comme énoncé plus haut, la lithologie et les conditions hydrodynamiques de la nappe, ainsi que l'évaporation qui régnaient pendant cette période, ont contribué à l'acquisition de ces faciès dans le bassin. A l'aval de la nappe, le pôle cationique garde le même aspect, par contre le pôle anionique montre une dominance chloruré-sulfaté. La combinaison de ces ions a donné naissance aux faciès chloruré calcique et sulfaté calcique. Comme on l'a signalé auparavant, la lithologie, les conditions hydrodynamiques de la nappe et l'évaporation seraient à l'origine de ces faciès.

III-9. Interprétation

Toutes les charges dissoutes dans les écoulements de base ont donc essentiellement trois (3) sources, la composition chimique des précipitations, la minéralisation des roches affleurantes et la pollution. Par ailleurs, certains éléments, d'origine biochimique : $K+$, NO_3-, $SO4_2^-$, sont exportés en dehors des bassins versants par les eaux de surface, en faible quantité cependant. Leur recyclage par la végétation est rapide et ces ions ne subsistent qu'en très faibles concentrations dans les eaux de Nappe (Grimaldi, 1988). En effet, les ions $Cl-$, NO_3-, $K+$ et $SO4_2^-$ proviennent en général de la pollution fécale (Cl^-, $K+$) ou agricole ($K+$, NO_3-, $SO4_2^-$). L'élément $SO4_2^-$ peut aussi provenir des lessives souvent pratiquées au bord des rivières. Ces résultats confirment ceux obtenus dans le cadre de cette étude.

En Afrique de l'Ouest, les éléments chimiques dissous dans les précipitations ont trois sources principales ([10]; [11], cités par [12]): terrigène, océanique et biogénique. Dans notre zone, la poussière semble la source majeure d'émission d'éléments grossiers dont l'ensemble définit la source terrigène exprimée par Ca^{2+}, Mg^{2+} et $SO4^{2-}$. La mousson atlantique représente la source océanique définit par les éléments $Na+$ et Cl^-, la source biogénique est le fait des feux de brousse marqués par NO_3- et $K+$ ([8], [9]). En effet, les populations du milieu s'adonnent à la culture itinérante sur brûlis. L'influence de l'incendie sur la composition chimique des eaux de ruissellement se manifeste par l'augmentation de certaines teneurs en relation avec l'entraînement des éléments rendus rapidement mobilisables par la combustion des végétaux ([13]). Les effets du feu sont sensibles sur le calcium, le potassium et les ions carbonates. Ils se traduisent moins nettement dans le cas du magnésium et des ions ortho-phosphates. Le sodium et les ions chlorures, éléments peu abondants dans les végétaux, ne sont pas touchés par cette évolution.

Cependant, Na+ et K+ sont des éléments naturellement présents dans l'environnement, ils peuvent être apportés par le lessivage des argiles, des granites, des feldspaths, ou encore par les aérosols marins. Le Na+ a un comportement conservatif dans l'eau une fois qu'il a été libéré par les argiles, contrairement au potassium, qui a tendance à se réincorporer rapidement dans les minéraux argileux [8, 12, 14].

IV - CONCLUSION

En général, la signature chimique des eaux est donc majoritairement dominée par les ions Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na+, HCO_3-, K+ et Cl^-. En effet, la composition des eaux naturelles, en dehors des pollutions généralement d'origine anthropique, est le résultat combiné de la composition chimique des précipitations qui atteignent le sol et des réactions avec les minéraux présents dans l'encaissant ([8]). La désagrégation mécanique et l'altération chimique sont donc les deux phases qui contrôlent les réactions avec les minéraux de l'encaissant. L'altération chimique est d'autant plus rapide que les eaux météoritiques sont agressives. Une série de réaction entre cette eau et la formation encaissante va aboutir à l'ionisation et à l'entraînement des ions tels que Ca^{2+}, Mg^{2+} et Na+ en solution ([8]).

Les ions Ca^{2+}, Mg^{2+} et Na+ proviennent donc de l'altération chimique des roches affleurantes silicatées. Cette réaction est fonction du temps de contact et explique donc la faible minéralisation des écoulements de surface. Ceci confirme les résultats obtenus dans le cadre de la présente étude. Par ailleurs, les eaux sont caractérisées par une forte salinité et par la présence de quatre faciès dominants, marquant ainsi l'hétérogénéité de la lithologie. En effet, on peut citer le faciès bicarbonaté calcique et magnésienne caractérisant les eaux provenant des bordures calcaires, les faciès carbonaté sodique et potassique résultant des formations évaporitiques et enfin les faciès carbonaté surtout dans la partie nord-ouest du bassin.

RÉFÉRENCES

[1] - V. KRYSANOVA, F. HATTERMANN, F. WESHSUNG, Development of the ecohydrological model SWIM for regional impact studies and vulnerability Assessement. Hydrological Processes 19 (2005) 763-783

[2] - B. ARHEIMER, J. ANDRÉASSON, S. FOGELBERG, H. JOHNSSON, C.B. PERS and K. PERSSON, Climate change impact on water quality: model result from southern Sweden. Ambio 34 (2005) 559-566

[3] - J. LEHMAN, Mixing patterns and plankton biomass of the St. Lawrence Great Lakes under climate change scenarios. Journal of Great Lakes Research, 28(4) (2002) :583_596

[4] - C. O'REILLY, S. ALIN, P. PLISNIER, A. COHEN, and B. MCKEE, Climate change decreases aquatic ecosystem productivity of Lake Tanganyika, Africa. Nature, 424(6950) (2003) :766_768

[5] - S. H. TOTIN VODOUNON, M. BOKO, E. OGOUWALE, Dynamique de la mousson Ouest africaine, régime hydrologique et gestion de l'eau dans le bassin supérieur de l'Ouémé. LECREDE, (2002) 32-44

[6] - OMS, Preventing Violence and reducing its Impacts: How Development Agencies can help, OMS, Genève (2008)

[7] - D. MICHEL, Le forage d'eau : réalisation, entretien et réhabilitation, édition Masson Paris (1993)

[8] - B. KAMAGATE, Fonctionnement hydrologique et origine des écoulements sur un bassin versant de milieu tropical de socle au bénin : bassin versant de la Donga (haute vallée de l'Ouémé). Thèse de Doctorat Université MONTPELLIER II, Sciences et Techniques du LANGUEDOC, (2006)

[9] - A. J. S. AKOGNONGBE, Analyse hydrologique multi-échelle du bassin de l'Ouémé supérieur : processus dominats à l'origine des écoulements. Mémoire de Master Recherche, HSM/UM2, Montpellier (France), (2009)

[10] - J.D. TAUPIN, R. GALLAIRE, Y. ARNAUD, Analyses isotopiques et chimiques des précipitations sahéliennes de la région de Niamey au Niger : implications climatologiques. in : Hydrochemistry, Rabat symposium AISH publ. 244 (2002) , 151-162,

[11] - R. FREYDIER, B. DUPRE, J.P. LACAUX, Precipitation chemistry in intertropical Africa. Atmospheric Environment 32 (1998) 749-765

[12] - C. ATINDOGBE, Analyse de la composition chimique des eaux de surface sur les sous-bassins versants de l'Ouémé supérieur : conséquences sur l'acquisition de la minéralisation et discrétisation de l'origine des eaux. Diplôme d'Etude Supérieure Spécialisée (DESS) en Management de l'Environnement et Qualité des Eaux (MEQuE). Université d'Abomey- Calavi. FAST, (2007)

[13] - R.C. ELLIS and A.M. GRALEY, Gains and losses in soil nutrients associated with harvesting and burning eucalyptus rainforest. Plant and Soil, vol. 74 (1983) p437-450

[14] - M. RABIET, Contamination de la ressource en eau par les eaux usées dans un bassin versant Méditerranéen ; Apport des éléments majeurs, traces et terres rares, Univ. Montpellier II (2006)