



## **ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES ET BACTERIOLOGIQUES DES EAUX DE TROIS AQUIFERES DE LA REGION DE TILLABERY : APPLICATION DES METHODES D'ANALYSES STATISTIQUES MULTI VARIEES**

**AMADOU H., LAOUALI M.S., MANZOLA A.**

Laboratoire de Chimie de l'eau, Faculté des sciences et Techniques  
Université Abdou Moumouni de Niamey,  
Bp 10662 Niamey-NIGER

haoua\_amadou2000@yahoo.fr

### **RESUME**

Les eaux souterraines constituent l'une des principales sources d'approvisionnement en eau potable de la population de la région de Tillabéry. La présente étude s'intéresse à la qualité des eaux de trois aquifères (le continental terminal 2, le socle fracturé et les alluvions du Dallol Bosso) de la région de Tillabéry. L'objectif est d'améliorer les connaissances sur les nappes souterraines et de déterminer l'origine de la minéralisation de ces eaux. Ce travail a été mené à partir d'une combinaison des résultats d'analyses de paramètres physico-chimiques et bactériologiques, sur des échantillons d'eaux de puits et forages de certaines localités de la région, et de l'analyse statistique multi variée (Analyse en Composantes Principales Normées (ACPN) et Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)).

L'analyse hydro chimique a montré d'importantes valeurs de la conductivité dans les eaux de certaines localités telles que Diagorou ( $794 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), Sawani ( $736 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), Bonkoukou ( $716 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ). Des valeurs importantes en Fer, dans la localité de Abala ( $0,43 \text{ mg/L}$ ), en nitrites et nitrates ont été relevées. Ainsi que la contamination de tous les puits par les germes de la contamination fécale. La combinaison des deux méthodes d'analyse statistique indique que la minéralisation des eaux souterraines de la zone de Tillabéry est contrôlée par deux grands phénomènes: la minéralisation temps de séjour qui se traduit par l'hydrolyse des minéraux silicatés, l'apport d'eaux par infiltrations superficielles dans la nappe (le pluviolessivage des sols). L'analyse en

Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) a permis d'identifier trois groupes d'eau de compositions chimiques différentes. Dans l'ensemble, la qualité des eaux souterraines est bonne mais nécessite dans certains cas (les eaux du puits et eau du fleuve), un traitement spécifique avant approvisionnement.

**Mots-clés:** Eaux souterraines, paramètres physico-chimiques, Analyse en Composantes Principales Normées, Classification Hiérarchique Ascendante, minéralisation.

## ABSTRACT

Groundwaters constitute one of the main sources of supply in drinking water of the population of the region of Tillabery. The present study is interested in the quality of waters of three aquifers (continental terminal 2, the broken base and the alluviums of the dallol Bosso) of the region of Tillabery.

The aim of this study is to improve the knowledge on ground-water sheets and to determine the origin of the mineralization of these waters. This work was led from a combination of the physico-chemical analyses and bacteriological parameters, on samples of waters of wells and drillings of certain localities of the region, and the multi-statistical varied analysis (Analyze in Standardized Main Components (ACPN) and Ascending Hierarchical Classification (CHA)). The hydro analysis chemical showed important values of an electrical conductivity in waters of certain localities such as Diagorou (794  $\mu\text{S.cm}^{-1}$ ), Sawani (736  $\mu\text{S.cm}^{-1}$ ), Bonkoukou (716  $\mu\text{S.cm}^{-1}$ ). Significant Iron values, in the locality of Abala (0,43mg / L), nitrites and nitrates values in other localities were found well as contamination of all the wells by germs of faecal contamination.

The combination of both methods of static analysis allowed to identify two important phenomena in the acquisition of the mineralization of waters. The main phenomenon is the dissolution of the rock by the contact water rock (mineralization residence time). The second phenomenon is superficial contributions bound to water inputs through superficial infiltrations in the aquifer. The analysis in Ascending Hierarchical Classification (CHA) allowed to identify three groups of water of different chemical composition. The groundwater resources in the region of Tillabery have a good physico-chemical quality but require in certain cases (waters of the well and the water of the river) a specific treatment before supply.

**Keywords:** Groundwater, physicochemical parameters, mineralization, Analyze in Standardized Main Components, Ascending Hierarchical Classification.

## **INTRODUCTION**

Le Niger, à l'instar des autres pays sahéliens est confronté à des problèmes d'eau parfois assez graves dans certaines localités. Le pays est certes traversé par un important cours d'eau, le fleuve Niger, et recèle par ailleurs des nappes souterraines appréciables (Hassane, 2010). Toutefois se pose le problème de la maîtrise de la ressource et de l'approvisionnement des différents consommateurs aussi bien en ville qu'en milieu rural. En effet, les eaux souterraines en milieu urbain subissent de multiples contraintes dues à une forte croissance démographique et à l'inadaptation ou même l'absence d'assainissement (Foster, 2001; Nkhuwa, 2003; Dongo et al., 2008; Hassane, 2010). Les réseaux d'égouts, les fosses septiques, les eaux usées des usines et les déchets solides sont les sources principales de pollution des eaux souterraines dans le secteur urbain. Dans les zones périurbaines, l'agriculture via les intrants agricoles contribue aussi à dégrader la qualité des nappes phréatiques. La consommation d'eau polluée par les populations a pour conséquence le développement des maladies hydriques dues, entre autres, aux germes pathogènes, aux produits cancérogènes et aux composés azotés (Hassane, 2010).

Le réseau d'adduction en eau potable, totalement alimenté par le fleuve Niger, ne couvre pas toutes les localités des villes. Les populations font largement recours aux eaux de puits et de forage. Ces ouvrages sont souvent mal protégés et les eaux souterraines fortement contaminées. La nécessité de s'intéresser à la qualité des eaux souterraines s'est imposée après le creusement des cent vingt forages du programme d'urgence suite à la sécheresse des années 1984, 1985 et 1986, suivie d'un sévère étiage du fleuve Niger. L'analyse des données obtenues lors des récentes études (Margueron, 2000; Chippaux et al., 2002) a montré que le risque de pollution de la ressource en eau souterraine, en particulier par les composés azotés et les bactéries, est réel. Il s'avère, donc nécessaire, que la gestion des eaux souterraines soit une priorité. Ainsi, la présente étude s'intéresse à la qualité des eaux de trois aquifères (le continental terminal (CT2), le socle fracturé et les alluvions du Dallol Bosso) de la région de Tillabéry. L'objectif de cette étude est de caractériser le contexte hydrogéologique et microbiologique de ces aquifères, pour une compréhension de l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines de cette région. Pour atteindre l'objectif de cette étude, des travaux de terrain et de laboratoire ont été réalisés tant en hydrogéologie, qu'en microbiologie. Les données collectées ont été traitées en utilisant une combinaison de méthodes statistiques multi variées (Analyse en Composantes Principales Normées (ACPN) et Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)).

## MATERIEL ET METHODES

### Présentation de la zone d'étude

La région de Tillabéry est située au Sud-Ouest de la République du Niger. Elle couvre une superficie d'environ 97 506 km<sup>2</sup>. La région est traversée par le fleuve Niger. C'est un plateau à environ 250 m d'altitude coupé par des cours d'eau non permanents (Gorouol, Sirba) ou permanents (Mékrou, Tapoa). À l'Est, dans le département de Filingué, elle comprend une partie de la vallée du Dallol Bosso, empreinte du cours d'eau fossile de l'Azawak.

Le « Continental terminal » en affleurement occupe toute la partie occidentale du territoire nigérien. Il constitue une partie du bassin sédimentaire des IULLEMMEDEN qui, dans son ensemble, est limité par les méridiens 1<sup>0</sup> et 9<sup>0</sup> Est et par les parallèles 10<sup>0</sup> et 21<sup>0</sup> Nord. Ce bassin occupe donc non seulement la partie Ouest du Niger, mais déborde sur le Sud Algérien, le Mali, le Dahomey, le Nigeria. Il s'étend sur environ 1100 km du Nord au Sud et 800 km de l'Est à l'Ouest.

Les études réalisées sur le « Continental terminal » du Niger considèrent trois séries bien distinctes (Greigert, 1966) :

- CT3 « Grès argileux du Moyen Niger » en affleurement, correspond à toute la partie Sud du « Continental terminal » du Niger ;
- Le CT2 « Série argilo-sableuse à lignite » en affleurement est répandu dans le Nord et au centre de la partie occidentale du Niger ;
- Le CT1 « Série sidérolithique de E'Adar Douchi en affleurement correspond à la limite Ouest et partiellement Nord du Continental terminal.

### Méthodologie

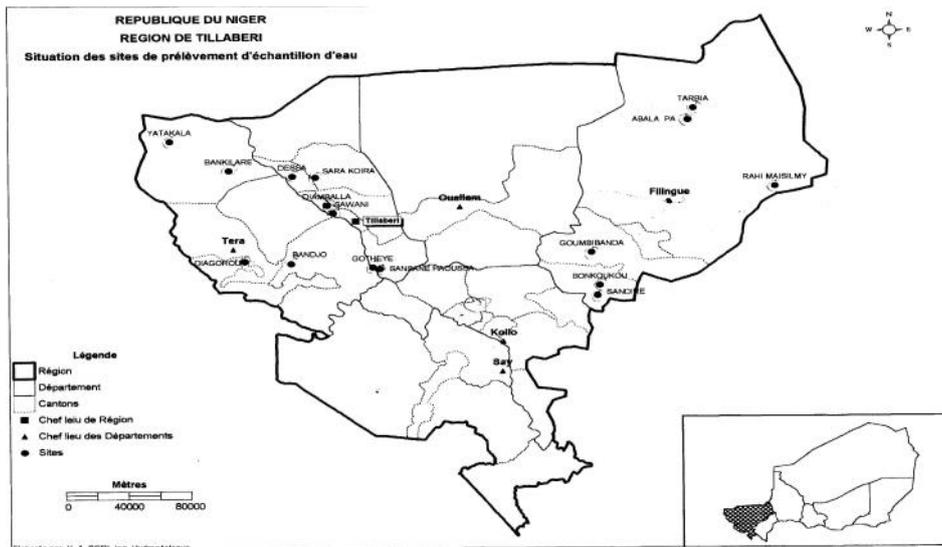
Les analyses physico-chimiques ont été réalisées sur les eaux de forages et puits captant les nappes du CT2, du socle fracturé, et du Dallol Bosso de la région de Tillabéry. Les prélèvements ont été réalisés et conditionnés dans des flacons spécialement préparés à cet effet. Les prélèvements pour les forages munis de robinets ont été effectués après avoir fait couler l'eau dans le vide pendant environ trois minutes. Les flacons d'échantillonnage ont été ensuite remplis à des fins d'analyse. Pour les puits, les prélèvements ont été effectués à l'aide d'un échantillonneur spécialement conçu. Le dispositif d'échantillonnage a été soigneusement lavé à l'eau distillée avant chaque prélèvement.

Les paramètres physiques à savoir le pH, la température, la conductivité, la turbidité et la couleur, ont été mesurés *in situ* respectivement à l'aide d'un pH-mètre, un colorimètre portatif qui couvre les longueurs d'onde de 400 à 800

nanomètres équipé d'une lampe à filament de tungstène, un conductimètre de marque WTW 330 et d'un turbidimètre portatif de marque Hach 2100 Q. La couleur a été déterminée en utilisant Norme Française NF T 90-034. Les paramètres chimiques :  $\text{Fe}^{2+}$  et  $\text{Na}^+$ ;  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ;  $\text{F}^-$ ;  $\text{HCO}_3^-$ ;  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NO}_2^-$  ont été analysés dans le Chef-Lieu de la région où un laboratoire a été spécialement aménagé. Ces analyses ont été réalisées à l'aide d'un spectrophotomètre en utilisant les méthodes classiques préconisées par les normes françaises AFNOR. En ce qui concerne la microbiologie, l'échantillonnage a été réalisé dans des tubes à essai stérilisés par autoclavage à 121 °C pendant 20 minutes. Les tests bactériologiques ont été ceux des coliformes fécaux et des streptocoques fécaux, qui sont des tests recommandés par l'OMS pour le cas des eaux de boisson.

La méthode utilisée pour isoler et déterminer ces bactéries, a été la technique par filtration. C'est une méthode très sensible qui permet de déterminer les bactéries à des faibles concentrations. Elle a consisté à filtrer un volume de 10 ml d'échantillon sur une membrane en cellulose de 45 cm de diamètre et de taille de pores 0,45  $\mu\text{m}$ . Pour faciliter le comptage des colonies, des filtres stériles et quadrillés ont été utilisés. Une rampe de filtration à trois postes en inox toujours stérilisée par flambage à l'alcool avant toute filtration a permis de filtrer les échantillons. Les filtres ont été ensuite déposés sur un milieu nutritif contenu dans des boîtes de pétri. Ces boîtes de pétri ont été ensuite placées dans des incubateurs réglés à 37 °C pour les streptocoques et à 44 °C pour les coliformes. La lecture a été faite après 24 heures et 48 heures de séjour dans les incubateurs.

Aussitôt prélevés, tous les échantillons ont été placés dans une glacière contenant de la glace et directement acheminés sur les lieux d'analyse au plus tard quatre (4) heures de temps après les prélèvements. Les échantillons d'eau destinés aux analyses chimiques ont été prélevés dans 17 cantons de la ville de Tillabéry (Figure1). Le choix des sites a été basé sur la construction récente du puits ou du forage et sur les points d'eau les plus utilisés par la population.



**Figure 1** : Différents sites de prélèvement d'échantillons dans la région de Tillabéry

Les aquifères échantillonnés ont été répartis comme suit :

- Le continental terminal 2 avec trois (3) puits à Terbiet, Abala et Rwfai Maïchilmi et un forage à Goumbi Banda.
- Le Socle fracturé : 8 forages échantillonnés à savoir Diagorou, Bandio, Gotheye, Diamballa, Sawani, Sara kaira , Dessa et Sansané Haoussa.
- Les alluvions du Dallol Bosso : 2 puits (Yatakala, Bankilaré) et 2 forages (Sandiré, Bonkoukou) ont été échantillonnés. Enfin un échantillon d'eau du fleuve Niger dans la localité de Gotheye a été également prélevé.

### Analyse statistique

L'ensemble des données collectées sur les eaux souterraines de la région a fait l'objet d'une analyse statistique. L'approche de la statistique multi variée a été réalisée à partir d'une Analyse en Composantes Principales Normées (ACPN) et d'une Classification Hiérarchique Ascendante (CHA). L'analyse statistique a été réalisée sur 17 échantillons et 12 variables (la conductivité électrique (C.E), le pH, la dureté, la turbidité,  $Na^+$ ,  $F^-$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$  et  $NO_2^-$ ) à l'aide du logiciel XLSTAT 2014. Cette analyse permet de synthétiser et de classer un nombre important de données afin d'en extraire les principaux facteurs qui sont à l'origine de l'évolution simultanée des variables et de leur relation réciproque (Biémi, 1992). Elle permet de mettre en évidence les

ressemblances entre deux ou plusieurs variables chimiques au cours de leur évolution.

## **RESULTATS**

Les résultats des analyses physico-chimiques et bactériologiques réalisées sur les eaux souterraines de la région de Tillabéry ont été présentés dans le Tableau 1. La température des eaux souterraines varie entre 28,4 °C et 31,3 °C, avec une moyenne de  $29,4 \pm 0,1$  °C. La température des eaux du fleuve Niger est de 27 °C. Le pH des eaux varie entre 6,6 et 7,8 unités pH, avec une moyenne de  $7,3 \pm 0,1$ . La conductivité électrique des eaux souterraines de la région est faible et varie entre 33 et 794  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , avec une valeur moyenne de  $383,4 \pm 22$   $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Les eaux à forte conductivité proviennent des eaux du socle fracturé principalement celles des localités de Diagorou (794  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), Sawani (736  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), Diambala (515  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), Gotheye (549  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) et Bandio (569  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ). La dureté des eaux souterraines de la région varie entre 0,85 °F et 26,5 °F, soit une moyenne de  $12,95 \pm 9$  °F. Il faut noter que pour l'eau destinée à la consommation humaine, l'OMS ne recommande pas de valeur mais indique qu'une dureté élevée peut provoquer la formation de dépôts tandis qu'une faible dureté peut engendrer des problèmes de corrosion. On peut considérer qu'une eau présente une dureté élevée si celle-ci est supérieure à 25 °F soit 250 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ . Cela indique que les eaux du fleuve et les eaux de puits de la région sont dans l'ensemble très douces à l'exception de celle de la localité de Bonkoukou (17,1 °F) qui est moyennement dure comme les eaux des forages dans leur ensemble. Les eaux des puits et l'eau du fleuve Niger se caractérisent par la présence de matières en suspension responsables de la couleur qui varie entre 15 et 260 mg/lPt et de la turbidité qui varie respectivement entre 2 et 35 NTU. L'analyse microbiologique montre une infestation poussée de tous les puits. Les concentrations varient entre de 240 à 12000 UFC pour 100 ml pour les coliformes fécaux; et de 12 à 72 UFC pour 100 ml pour les streptocoques fécaux. Les forages à pompe sont en général caractérisés par une absence totale de germes de contamination fécale.

### **Résultats de l'Analyse en Composantes Principales Normées (ACPN)**

Les résultats de l'Analyse en Composantes Principales Normées sont présentés sous forme de tableaux et graphiques. La liaison existant entre toutes les variables prises deux à deux et les coefficients de corrélation entre ces différentes variables ont été donnés par la matrice de corrélation (Tableau 2). Le Tableau 2 montre que la conductivité électrique (C.E) est fortement corrélée avec les éléments suivant:  $\text{HCO}_3^-$ (0,78),  $\text{Na}^+$ (0,84),  $\text{Cl}^-$ (0,70) et la dureté (0,89). La dureté de l'eau est un indicateur du niveau de calcaire dans l'eau notamment

le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et le magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ). Les ions  $\text{Fe}^{2+}$  présentent une bonne corrélation avec la turbidité (0,95). Le  $\text{SO}_4^{2-}$  est corrélé avec  $\text{Cl}^-$  (0,89) et à un degré moindre avec  $\text{F}^-$  (0,69) et  $\text{Na}^+$  (0,65). Les ions  $\text{F}^-$  sont corrélés avec  $\text{Cl}^-$  (0,74) et  $\text{Na}^+$  (0,73). Le  $\text{HCO}_3^-$  présente une forte corrélation avec la dureté (0,90) et à un degré moindre avec le  $\text{Na}^+$  (0,69). Enfin, les  $\text{Cl}^-$  sont fortement liés aux  $\text{Na}^+$  (0,78). La teneur en  $\text{Na}^+$  devrait équilibrer la teneur en  $\text{Cl}^-$ , le déficit en  $\text{Na}^+$  est expliqué par le phénomène d'échange de base ionique entre l'eau et l'aquifère. Les variables ne présentant apparemment aucune relation satisfaisante avec les autres variables sont le pH, nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ) et nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ). Les corrélations entre les différents variables mettent en évidence la similarité des phénomènes à l'origine de la mise en circulation de ces ions dans les eaux souterraines de la zone de Tillabéry.

**Tableau 1 :** Données physico-chimiques en  $\text{mg.L}^{-1}$  des eaux souterraines de la région de Tillabéry.

Paramètres / Localités	GOUNBI BANDA	TERBIET	ABALA	RWAFI MAÏCHILMI	BONKOUKOU	SANDIRE	BANKILARE	YATAKALA	GOTHEYE Fleuve
Aquifère	CT2	CT2	CT2	CT2	NA DB	NA DB	NA DB	NA DB	
Ouvrage	F	P C	P C	P C	P C	P C	F	F	Fleuve
CE ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$ )	33	157	131	105	716	256	570	107	59
pH	7,44	7,51	7,18	7,45	7,52	7,6	7,03	7,83	7,8
T (°C)	29,7	28,6	29,9	28,9	25,8	29,5	28,5	28,5	27
Couleur mg/lPt	0,00	65	146	30	15	20	0,00	0,00	260
Turbidité NTU	0,00	18	22	4	2	2	0,00	0,00	35
$\text{SO}_4^{2-}$	4,37	11,34	20,99	8,27	23,65	10,93	9,50	4,58	12,99
$\text{NO}_2^-$	0,00	0,02	0,04	0,03	0,99	0,56	0,00	0,00	0,05
$\text{Fe}^{2+}$	0,00	0,15	0,43	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,65
$\text{F}^-$	0,00	0,41	0,28	0,12	0,34	0,12	0,21	0,05	0,00
$\text{NO}_3^-$	5,91	19,84	0,01	28,03	43,80	42,65	0,00	0,00	0,09
$\text{HCO}_3^-$	24,4	42,70	56,12	20,74	43,92	47,58	372,10	80,52	45,14
$\text{Cl}^-$	3	6	3	3	22	12	9	4	4
Dureté (° F)	0,85	3,10	2,10	3,50	17,10	5,85	26,5	4,70	2,20
$\text{Na}^+$	2,90	14,20	16,20	4,80	27,40	9	17,5	5,50	4,20
Coliforme F	0,00	12000	480	460	630	240	0,00	0,00	1600
Streptocoque	0,00	72	14	15	12	12	0,00	0,00	14

CT2 : Continental Terminal 2

NADB : Nappe d'Alluvion Dallol Bosso

SF : Socle Fracturé

PC : Puits Cimenté

F : Forage

**Tableau 1 (suite) :** Données physico-chimiques en mg.L<sup>-1</sup> et bactériologiques (UFC/100ml) des eaux souterraines de la région de Tillabéry.

Paramètres / Localités	DIAGOROU	BANDIO	GOTHEYE Forage	SARA KOIRA	DESSA	DIAMBALLA	SANSANE HAOUSSA	SAWANI
Aquifère	S F	S F	S F	S F	S F	S F	S F	S F
Ouvrage	F	F	F	F	F	F	F	F
CE (µS.cm-1)	794	569	549	307	266	515	325	735
pH	7,05	7,21	7,1	6,66	7,18	7,28	7,03	7,62
T (°C)	30,2	31,2	31,3	29,9	29,4	31,2	29,8	28,4
Couleur mg/1Pt	0,00	0,00	0,00	0,00	16	0,00	0,00	0,00
Turbidité NTU	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SO42-	20,99	6,01	6,83	8,68	7,04	4,17	5,19	75,76
NO2-	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,16
Fe2+	0,00	0,05	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00
F-	0,54	0,05	0,21	0,38	0,17	0,46	0,08	0,72
NO3-	35,28	19,28	1,46	36,18	0,38	0,76	0,19	0,00
HCO3-	448,96	366,00	341,60	120,78	165,31	346,48	203,74	305
Cl-	19	6	14	13	3	6	5	45
Dureté (° F)	23,50	20,00	23,10	9,90	10,95	23,60	14,50	18
Na+	61	40,00	29,10	28	10,50	18	10,50	60,80
Coliforme F	0,00	4	0,00	0,00	32	0,00	0,00	56
Streptocoque	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00

La dureté de l'eau est un indicateur du niveau de calcaire dans l'eau notamment le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et le magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ). Les ions  $\text{Fe}^{2+}$  présentent une bonne corrélation avec la turbidité (0,95). Le  $\text{SO}_4^{2-}$  est corrélé avec  $\text{Cl}^-$  (0,89) et à un degré moindre avec  $\text{F}^-$  (0,69) et  $\text{Na}^+$  (0,65). Les ions  $\text{F}^-$  sont corrélés avec  $\text{Cl}^-$  (0,74) et  $\text{Na}^+$  (0,73). Le  $\text{HCO}_3^-$  présente une forte corrélation avec la dureté (0,90) et à un degré moindre avec le  $\text{Na}^+$  (0,69). Enfin, les  $\text{Cl}^-$  sont fortement liés aux  $\text{Na}^+$  (0,78). La teneur en  $\text{Na}^+$  devrait équilibrer la teneur en  $\text{Cl}^-$ , le déficit en  $\text{Na}^+$  est expliqué par le phénomène d'échange de base ionique entre l'eau et l'aquifère. Les variables ne présentant apparemment aucune relation satisfaisante avec les autres variables sont le pH, nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ) et nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ). Les corrélations entre les différentes variables mettent en évidence la similarité des phénomènes à l'origine de la mise en circulation de ces ions dans les eaux souterraines de la zone de Tillabéry.

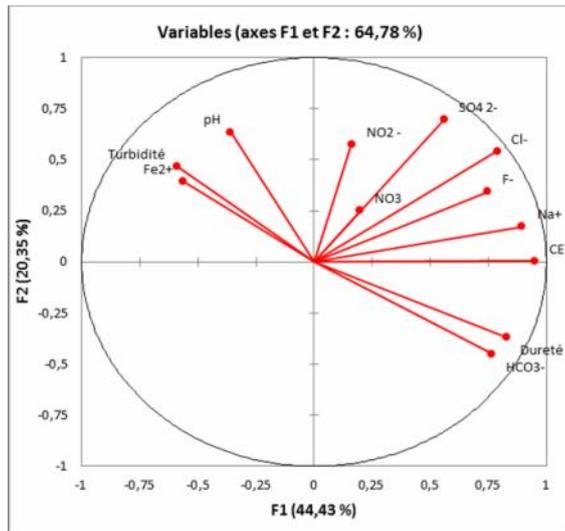
L'analyse des résultats de l'ACP a permis également de calculer les valeurs propres et les variances exprimées pour chaque facteur et leur cumul (Tableau 3). L'analyse sur le plan factoriel F1-F2 a mis en évidence les tendances générales. En effet, le facteur F1, a une variance exprimée de 44,43%, le plus important. Ensuite, vient le facteur F2 avec 20,35% de la variance exprimée. Le cumul de la variance exprimée est de 64,78% pour les deux facteurs.

**Tableau 2:** Matrice de corrélation.

Variables	CE	pH	Turb	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_2^-$	$\text{Fe}^{2+}$	F	$\text{NO}_3^-$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	Dureté	$\text{Na}^+$
CE	<b>1</b>											
pH	-0,306	<b>1</b>										
Turbidité	-0,483	0,364	<b>1</b>									
$\text{SO}_4^{2-}$	0,459	0,239	0,016	<b>1</b>								
$\text{NO}_2^-$	0,288	0,320	-0,068	0,239	<b>1</b>							
$\text{Fe}^{2+}$	-0,440	0,296	<b>0,958</b>	0,016	-0,104	<b>1</b>						
F	<b>0,631</b>	-0,185	-0,158	<b>0,693</b>	0,102	-0,224	<b>1</b>					
$\text{NO}_3^-$	0,212	-0,092	-0,179	-0,031	0,595	-0,279	0,161	<b>1</b>				
$\text{HCO}_3^-$	<b>0,779</b>	-0,462	-0,446	0,164	-0,318	-0,358	0,406	-0,195	<b>1</b>			
$\text{Cl}^-$	<b>0,702</b>	0,075	-0,271	<b>0,893</b>	0,374	-0,283	<b>0,743</b>	0,187	0,341	<b>1</b>		
Dureté	<b>0,898</b>	-0,455	-0,535	0,156	0,019	-0,466	0,429	-0,035	<b>0,907</b>	0,420	<b>1</b>	
$\text{Na}^+$	<b>0,843</b>	-0,273	-0,307	<b>0,651</b>	0,054	-0,272	<b>0,738</b>	0,216	<b>0,692</b>	<b>0,781</b>	<b>0,634</b>	<b>1</b>

**Tableau 3:** Valeurs propres et pourcentages exprimés pour les axes principaux.

	<b>F1</b>	<b>F2</b>
Valeur propre	5,331	2,443
% Total de la variance exprimée	44,429	20,355
Cumul de la variance exprimée (%)	44,429	64,784



**Figure 2:** Analyse dans l'espace des variables (plan factoriel F1 – F2).

Ces axes factoriels retenus pour cette analyse statistique sont supposés représentatifs de la variance de l'ensemble des données (Figure 2). Le facteur F1 (44,42%) est fortement corrélé à la conductivité électrique (0,95), corrélé aussi avec deux groupes d'éléments chimiques :

- Le premier groupe est formé de  $\text{Na}^+$  (0,89),  $\text{F}^-$  (0,74) et  $\text{Cl}^-$  (0,79). La présence de ces ions est liée à la dissolution des minéraux susceptibles de se former par évaporation des eaux chargées en sels et à la dissolution des formations évaporitiques.

- Le deuxième groupe est formé des ions  $\text{HCO}_3^-$  (0,76) et la dureté (0,82). Leur présence est liée à la dissolution des carbonates.

Les éléments qui définissent ce facteur proviennent d'une longue durée de mise en solution suite au contact eau-roche. Ces éléments proviennent de l'hydrolyse des minéraux silicatés présents dans les roches qui constituent le substratum rocheux des aquifères qui abritent les eaux de la région. En effet, l'hydrolyse étant un processus lent, il revient que le facteur F1 rende compte des conditions d'acquisition du chimisme de l'eau. Le facteur F1 exprime donc le phénomène de minéralisation-temps de séjour.

Le facteur F2 représente 20,35% de la variance de l'inertie du nuage des points représentatifs des ouvrages. Il est déterminé par les nutriments pH,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_2^-$  et  $\text{NO}_3^-$  qui ont une origine essentiellement anthropique et sont introduits dans le sous-sol, soit par lessivage des engrais épandus, soit par le rejet des eaux usées. La présence des nitrates est aussi attribuée à la dégradation de la matière organique par les micro-organismes dans les couches superficielles du sol, avec production de  $\text{CO}_2$  pour être entraînés ensuite en profondeur par les eaux

d'infiltration. Le facteur F2 exprime donc les échanges mettant en évidence le phénomène de pluvioléssivage des sols.

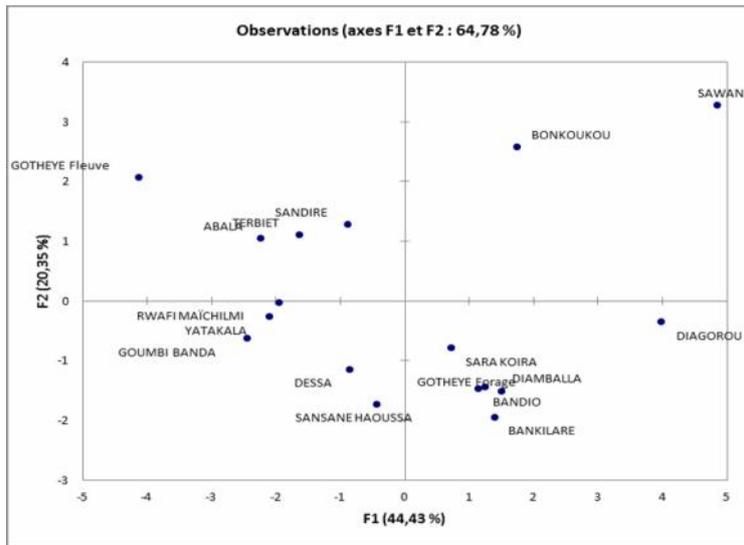
La représentation graphique dans l'espace factoriel des unités statistiques (Figure 3) montre la répartition des points d'eau en fonction des différents facteurs F1-F2. L'analyse de ce graphe a montré trois principaux regroupements des points d'eau :

- La classe 1, contient les eaux les plus minéralisées de la zone d'étude. Ces points d'eau correspondent aux forages profonds qui captent le socle fracturé et concerne 41,17% des eaux. Ces eaux sont riches en bicarbonates, avec des teneurs de 366 mg/L à Bandio, 346, 48 mg/L à Diamballa, 341,6 mg/L à Gotheye Forage, 203,74 mg/L à Sansane Haoussa ; 372,1 mg/L à Bankilare et 120,78 mg/L à Sara Koirra.

- La classe 2, regroupe les eaux faiblement minéralisées de la région (35,3%). Elle renferme la majorité des eaux de puits. Elles sont caractérisées par une présence de turbidité, des traces de fer et fluor. Ces eaux présentent également une teneur en nitrite et nitrates et aussi des germes de contamination fécale.

- La classe 3, regroupe des eaux de plus fortes conductivités électriques dont l'acquisition ionique est sous le contrôle de la minéralisation-temps de séjour : ce sont des eaux de 2 forages Sawani (735  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) Diagorou (749  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) et d'un puits Bonkougou (716  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Ces eaux sont fortement minéralisées mais se différencient des autres par la présence de paramètres physico-chimiques à teneurs plus élevées, cela met en évidence le phénomène de dissolution de la roche par les mécanismes d'hydrolyse.

Enfin, l'eau du fleuve Niger ne se retrouvant dans aucune des classes est une eau qui présente des valeurs de turbidité (35 NTH), couleur (260 mg/Ipt) et de germes de contamination fécale élevée. Les matières en suspension sont responsables de la couleur et de la turbidité des eaux.



**Figure 3:** Analyse dans l'espace des unités statistiques (plan factoriel F1 – F2).

### Résultats de l'Analyse en Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)

Le dendrogramme (Figure 4) issu de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) a mis en évidence deux principaux regroupements de variables. Le premier regroupement est constitué de  $\text{Na}^+$ , CE, dureté,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , et  $\text{Cl}^-$ , F. Ce groupe rend compte de la minéralisation-temps de séjour ou du phénomène de l'hydrolyse des minéraux bicarbonates et silicatés. Le second groupe constitué de  $\text{Fe}^{2+}$ , Turbidité, pH,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ , indique la contribution de la dégradation de la matière organique dans la minéralisation des eaux souterraines de la région. Ce groupe met également en évidence le phénomène de minéralisation gouverné par l'infiltration des eaux de pluie dans les aquifères.

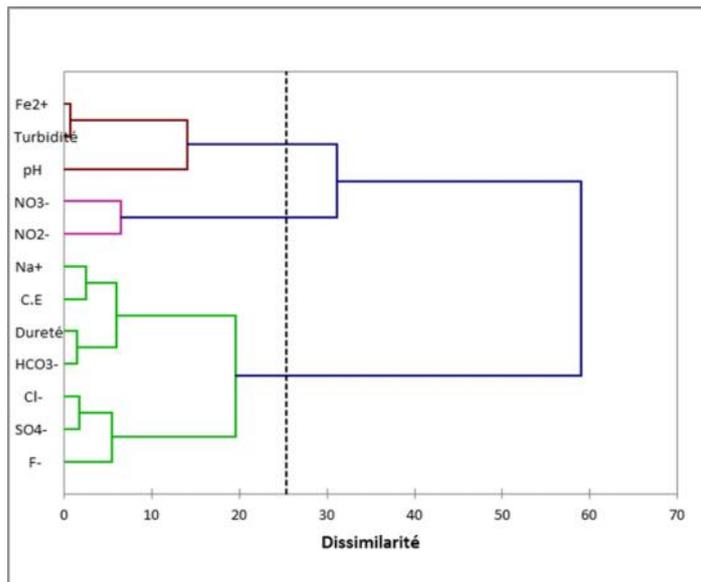


Figure 4 : Dendrogramme des eaux souterraines de la zone de Tillabéry.

## DISCUSSION

L'étude des paramètres physico-chimiques a montré une grande variabilité chimique des eaux souterraines. Les températures des eaux souterraines étudiées varient entre La température des eaux souterraines varie entre 28,4 °C et 31,3 °C, avec une moyenne de  $29,4 \pm 0,1$  °C. La norme étant fixée de 25 à 30 °C. Ces eaux sont conformes à la recommandation de l'OMS. L'analyse hydro chimique a montré d'importantes valeurs de la conductivité dans les eaux de certaines localités. Ces fortes valeurs de la conductivité électrique pourraient s'expliquer par l'infiltration des eaux usées dans la nappe phréatique ou des fosses septiques avoisinantes.

La concentration maximale de fer acceptable dans une eau de boisson a été fixée à 0,3 mg/L par l'OMS (2008). Cette norme a été définie pour répondre plus à des critères esthétique et organoleptique qu'à des critères sanitaires. En effet, l'ingestion de fer semble plus nécessaire à l'homme. Cet élément est généralement conseillé aux hommes qui ont une carence en fer. Les fortes teneurs en fer enregistrées dans certaines localités (Abala, Gotheye fleuve) constituent un problème majeur. En effet, le fer confère à l'eau un goût métallique désagréable, un aspect et une couleur rouge brun, qui amènent les populations rurales à se tourner vers d'autres sources d'approvisionnement dont les qualités bactériologiques sont douteuses. En outre, le fer peut être en solution vraie, à l'état colloïdal, plus ou moins combiné à la matière organique, sous forme de complexes organiques ou minéraux ou sous forme de particules

en suspension. Au contact de l'air, l'ion ferreux  $Fe^{2+}$  (soluble) est oxydé en ion ferrique  $Fe^{3+}$  (insoluble). Ainsi, la présence de l'oxyde de fer contenu dans l'eau confère à celle-ci sa turbidité et sa couleur rouge (Lasm et al., 2008).

L'Analyse en Composantes Principales et la Classification Ascendante Hiérarchique montrent des résultats semblables sur l'origine de la minéralisation des eaux souterraines de la région. Le mécanisme de la minéralisation des eaux souterraines est contrôlé par la nature des formations géologiques présentes dans la région. Le mécanisme de la minéralisation naturelle reste donc le processus majeur qui gouverne la chimie des eaux souterraines (Ahoussi, 2010; Eblin et al., 2014). En effet, l'origine des ions dans les eaux souterraines sont issues de l'altération des roches et de l'hydrolyse des minéraux après une longue durée de mise en solution.

La matrice de corrélation (Tableau 2), indique que les paramètres chimiques influençant la minéralisation des eaux de la zone sont le bicarbonate, le sodium, le fluor, la dureté (liée à la présence du calcium et du magnésium) et le chlorure. La présence dans l'eau de  $CO_2$  provenant des sols facilite l'hydrolyse des silicates qui permet la formation de  $HCO_3^-$  (Chemseddine et al., 2009; Kouassi et al., 2011). C'est la raison pour laquelle l'eau du socle fracturé présente simultanément les plus fortes teneurs en  $HCO_3^-$  (366 mg/L) et les plus forts pH (7,6).

Ainsi, les eaux du socle fracturé sont de la classe 1 fortement minéralisées. Les eaux souterraines profondes auraient une minéralisation plus stable dans le temps et plus importante que les eaux peu profondes.

Les eaux du continental terminal 2 correspondent à celles de la classe 2, très peu minéralisées, ces eaux présentent des germes de contamination fécale qui peut être due soit aux eaux de ruissellement qui entraîne des déchets dans les puits soit à l'action du vent qui introduit tout type de déchets dans les puits et/ou liées à la présence des animaux autour du puits.

Au niveau des alluvions du Dallol Bosso, les puits échantillonnés présentent une minéralisation moyenne à Sandiré (appartient aux eaux de la classe 2) et une forte minéralisation à Bonkougou (appartient aux eaux de la classe 3). On note respectivement pour les deux puits des concentrations en nitrates 42,65 mg/L et 43,8 mg/L très proches de la limite admissible 50 mg/L fixée par l'OMS (2008). En effet, les nitrates pourraient provenir d'une pollution d'origine humaine liée aux activités anthropiques qui à travers le phénomène du pluviollessivage des sols se retrouvent dans les eaux.

Enfin, les eaux du fleuve Niger présentent des paramètres chimiques et physico-chimiques en dessous du seuil fixé par l'OMS à l'exception de la couleur et la turbidité. Ces deux paramètres sont principalement dus aux matières en suspension et aux phytoplanctons présents dans ces eaux. Ces eaux sont généralement consommées par la population locale après une simple filtration.

## CONCLUSION

L'analyse statistique multi variée a conduit à la mise en évidence des différentes caractéristiques des eaux souterraines de la région. En effet, la représentation graphique dans l'espace factoriel des unités statistiques a mis en évidence trois (3) classes: la première classe regroupe les eaux ayant les plus fortes conductivités électriques dont l'acquisition ionique est sous le contrôle de la minéralisation-temps de séjour; la deuxième classe renferme les eaux des puits faiblement minéralisées. Elles sont surtout caractérisées par des valeurs de turbidité et de germe de contamination fécale ; la troisième classe caractérise des forages dont les eaux présentent une forte minéralisation mais qui différencient des autres forages par leurs teneurs élevées.

L'Analyse en Composantes Principales et la Classification Ascendante Hiérarchique indiquent que la minéralisation des eaux souterraines est contrôlée par la nature des formations géologiques présentes dans la région. Ainsi les principaux ions sont issus de l'altération des roches, de l'hydrolyse des minéraux silicatés, de la décomposition de la matière organique présentes dans le sol.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AHOUSSE K, SORO N, KOFFI Y, SORO G, ET BIEMI J. (2010). Origine de la minéralisation des eaux des aquifères discontinus sous couvert forestier de la zone Sud de la Côte d'Ivoire : cas de la région d'Abidjan-Agboville. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 4, n°3, 782-797.
- BIEMI J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants Subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Hydro structurale, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus des sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse d'Etat, Université Nationale de Côte d'Ivoire, p. 480.
- BOUBAKAR HASSANE A. (2010). Aquifères superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique: Cas de la communauté urbaine de Niamey (NIGER). Thèse de doctorat, Université Abdou Moumouni de Niamey, p. 249.
- BOUKARI M, GAYE C. B, FAYE A, FAYE S. (1996). The impact of urban development on coastal aquifers near Cotonou, Benin. *J Afr Earth Sci.*, vol. 22, 403-408.
- CHEMSEDDINE F, ABDERRAHMANE B, ABDELKADER R, ELIAS S. (2009). Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du complexe aquifère Morsott-Laouinet (Région Nord de Tébessa, Sud-Est algérien) *Afrique Science.*, Vol. 5, n° 2, 217-231.

- CHIPPAUX J. P, HOUSSIER S, GROSS P, BOUVIER C, BRISSAUD F. (2002). Etude de la pollution de l'eau souterraine de Niamey, Niger. Bull Soc Pathol Exot., Vol. 94, n°2, 119-123.
- DONGO K, KOUAME K. F, KONE B, BIEMI J, TANNER M, CISSE G. (2008). Analyse de la situation de l'environnement sanitaire des quartiers défavorisés dans le tissu urbain de Yopougon à Abidjan, Côte d'Ivoire. Vertigo, Vol. 8, n°3, 1-11.
- EBLIN S. G, SORO G. M, SOMBO A. P, AKA N, KAMBIRÉ O, SORO N. (2014). Hydrochimie des eaux souterraines de la région d'adiaké (sud-est côtier de la côte d'ivoire), Larhyss Journal, n° 17, 193-214.
- FOSTER S. S. D. (2001). The interdependence of groundwater and urbanisation in rapidly developing cities, Urban Water., Vol. 3, 185-192.
- GREIGERT J. (1966). Description des formations créacées et tertiaires du bassin des Iullemmeden (Afrique Occidentale). Direction des mines et la Géologie de la République du Niger, publ. no 2. BRGM, Paris, 237 p.c. à 1/000 000.
- KOTHARI N. (1988). Groundwater, iron and manganese: an unwelcome trio. Water/Engineering & Management, Vol.135, n°2, 25-26.
- KOUASSI M. A, YAO A. K, AKE Y. A, BIEMI J. (2011). Application des méthodes d'analyses statistiques multi variées à l'étude de la minéralisation des eaux des aquifères fissurés de la zone Guiglo-Duekoué (Ouest de la Côte d'Ivoire), International Journal of Biological and Chemical Sciences, Vol. 5, n°5, 2155-2169.
- LASM T, YAO K. T, OGA M. S, KOUAME K. F, JOURDA P, KOUADIO K. E, BAKA D. (2008). Analysis of the physico-chemical characteristics of groundwater in proterozoic land region of the Tiassale area (Southern Côte d'Ivoire), European Journal of Scientific Research., Vol. 20, n°3, 526-543.
- MARGUERON T. (2000). Etude de la pollution de la nappe de Niamey, pompage d'essai sur le forage n°IRH 21644 pour l'étude du transfert vertical de l'eau de la nappe phréatique vers le socle. Rapport Cermes/Coopération française. 19 p.
- NKHUWA D.C. W. (2003). Human activities and threats of chronic epidemics in a fragile geologic environment, Physics and Chermistry of the Earth., Vol. 28, 1139-1149.
- Office of Drinking Water. (1987). Estimated national occurrence and exposure to nitrate and nitrite in public drinking water supplies, US Environmental Protection Agency.
- OMS (2008). Guidelines for Drinking-water Quality, Third edition, incorporating the first and second Addenda, Recommendations). OMS: Geneva, 1, 515.