

Analyse en Composantes Principales des Paramètres Physico-chimiques et Bactériologiques des Ressources en eaux Destinées à la Consommation dans le Bassin Pétrolier de Doba au Tchad

Maoudombaye Théophile

Nodjiasmbayel Deoukor

Faculté des Sciences Exactes et appliquées, Université de Moundou, Tchad

Ngakou Albert

Faculté de Sciences, Université de Ngaoundéré, Cameroun

[Doi: 10.19044/esipreprint.12.2023.p660](https://doi.org/10.19044/esipreprint.12.2023.p660)

Approved: 15 December 2023

Posted: 17 December 2023

Copyright 2023 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Maoudombaye M., Nodjiasmbayel D. & Ngakou A. (2023). *Analyse en Composantes Principales des Paramètres Physico-chimiques et Bactériologiques des Ressources en eaux Destinées à la Consommation dans le Bassin Pétrolier de Doba au Tchad*. ESI Preprints.

<https://doi.org/10.19044/esipreprint.12.2023.p660>

Résumé

La présente étude a été réalisée dans le bassin pétrolier de Doba au Tchad. Il a porté sur l'analyse en composantes principales des paramètres physico-chimiques et bactériologiques des eaux de puits, de forages et rivières destinées à la consommation. Sur dix échantillons de chaque source ont été mis en évidence 8 paramètres physico-chimiques, 10 métaux lourds et 3 paramètres bactériologiques. Les paramètres physico-chimiques et les métaux lourds ont été analysés selon Rodier et al., 2009. *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* et streptocoques fécaux ont été dénombrés respectivement par la norme française V08-053, la norme française V08-057-1 et la méthode NF T 90-416. Les cercles de corrélation cumulent des inerties totales exprimées de 51,11 %, de 52,90 % et de 72,69 % respectivement entre les paramètres physico-chimiques et bactériologiques, les paramètres physico-chimiques et les métaux lourds, et les métaux lourds et les paramètres bactériologiques. L'analyse de la répartition des échantillons dans les plans factoriels du cercle de corrélation de tous les paramètres analysés a montré que l'axe 1 exprimerait une contamination en

métaux lourds des sources d'eau d'une part, et d'autre part, une pollution de type organique et une eutrophisation des milieux aquatiques. En revanche, l'axe 2 décrirait une pollution fécale représentée par *E. coli* et les streptocoques et une légère minéralisation indiquée par la conductivité électrique.

Mots-clés: Analyses en Composantes Principales, paramètres physico-chimiques et bactériologiques, bassin pétrolier de Doba au Tchad.

Principal Component Analysis of the Physico-Chemical and Bacteriological Parameters of Water Resources Intended for Consumption in the Oil Basin of Doba in Chad

*Maoudombaye Théophile
Nodjiasmbayel Deoukor*

Faculté des Sciences Exactes et appliquées, Université de Moundou, Tchad

Ngakou Albert

Faculté de Sciences, Université de Ngaoundéré, Cameroun

Abstract

This study was conducted in the Doba oil basin in Chad. It focused on the analysis in main components of the physico-chemical and bacteriological parameters of well, borehole and river water intended for consumption. Out of ten samples from each source, 8 physico-chemical parameters, 10 heavy metals and 3 bacteriological parameters were found. The physico-chemical parameters and heavy metals were analyzed according to Rodier et al. (2009). *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* and faecal streptococci were respectively counted by the French standard V08-053, the French standard V08-057-1 and the NF T 90-416 method. The correlation circles add up to total inertias which are expressed to 51.11%, 52.90% and 72.69% respectively between physico-chemical and bacteriological parameters, physico-chemical parameters and heavy metals, and heavy metals and bacteriological parameters. The analysis of the distribution of the samples in the factorial plans of the correlation circle of all the analyzed parameters showed that axis 1 would indicate heavy metal contamination of water sources on the one hand, and organic pollution and eutrophication of aquatic environments on the other hand. On the other hand, axis 2 would describe faecal pollution represented by *E. coli* and streptococci and slight mineralization indicated by electrical conductivity.

Keywords: Principal Component Analyses, physico-chemical and bacteriological parameters, Oil basin of Doba in Chad.

Introduction

L'eau est synonyme de vie depuis de temps immémoriaux, à tel point que les ramifications de son emploi ont plus été sujettes à débat que sa possession même. Sans cesse régénérée et toujours différente, l'eau que nous buvons est donc celle qui a connu l'histoire de la terre (Barhoumi *et al.*, 2004). L'eau qui est vitale pour l'existence peut devenir aussi une source de maladie hydrique (Ndahama *et al.*, 2014) à cause de sa contamination par des divers déchets d'origine minérale et organique que par les excréta (Kadjangaba *et al.*, 2023). Ainsi, les usagers subséquents pourront faire face à une possible dégradation de la qualité et de la quantité de l'eau (Young *et al.*, 1985). Une eau de consommation ne doit pas contenir de germes des maladies à transport hydrique, de substances toxiques ni de quantité excessive de matières minérales et organiques (Kassim, 2005).

Cependant, l'eau de boisson contient une grande variété de constituants microbiens et chimiques susceptibles de provoquer des effets préjudiciables pour la santé humaine (OMS, 2004). La plupart des produits chimiques ne sont préoccupants qu'en cas d'exposition sur une longue durée. Le principal problème de santé publique associé à la qualité microbienne de l'eau potable est celui des maladies entériques (Payment *et al.*, 2003).

En effet, l'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode d'analyse multi-variée permettant l'étude simultanée d'un grand nombre de variables dont l'information totale ne peut pas être visualisée à cause d'un espace à plus de trois dimensions. Cette méthode permettrait de préciser les relations entre les variables et les phénomènes à l'origine de ces relations (Ayadi *et al.*, 2008). Cette méthode est largement utilisée pour interpréter les données hydrochimiques (Bennasser, 1997). De ce fait, l'Analyse en Composantes Principales (ACP) a été utilisée sur les paramètres physico-chimiques et bactériologiques des ressources en eaux destinées à la consommation dans le bassin pétrolier de Doba au Tchad.

Présentation du site de travail

Le bassin pétrolier de Doba se trouve dans la Province du Logone oriental. Cette Province partage une bonne partie de sa frontière sud avec la République Centre Africaine et le Cameroun. Elle est limitée à l'Est, à l'Ouest et au Nord respectivement par le Mandoul, le Logone Occidental et la Tandjilé (CIRAD, 2005).

Le bassin pétrolier de Doba bénéficie des deux drainages importants qui sont le fleuve Logone et la Nyan. Le Logone traverse le côté

septentrional du bassin et coule de direction sud-ouest vers le nord. Le débit moyen annuel tourne autour de 347m³/s (ANTEA, 1995). De part et d'autre, les deux rives du Logone renferment de grandes plaines inondables, caractérisées par un drainage peu profond (Djémon, 2010).

La zone d'étude se trouve principalement dans le Département de la Nyan ayant pour chef-lieu Bébédjia, deuxième ville de la Province pétrolière. Ce département abrite la plupart des installations pétrolières : les puits d'extraction de Komé, Miandoum, Bolobo, Nyan, Maikiri, Moundouli et Timbré ; et les puits d'injection d'eau qu'ESSO a dû forer à côté des puits d'extraction pour réinjecter l'eau afin de maintenir le niveau de production. On y trouve les deux grandes bases d'ESSO où sont logés le personnel et les équipements, et les installations des entreprises sous contractantes (Djélarar, 2010). Outre les puits forés, les centrales de collectes du brut et les autres installations pétrolières, la zone est traversée par d'innombrables pistes les unes conduisant aux centrales de collectes et les autres suivant les lignes des pipes. A côté de ce dispositif gigantesque, on peut apercevoir un peu partout des carrières qui avaient été ouvertes pour les besoins des constructions et qui, bien que réhabilitées, sont pour la plupart impropres à l'agriculture. Ces carrières sont devenues de bassins de rétention d'eau de qualité douteuse (Djélarar, 2010). Dans le contexte de l'exploitation pétrolière, la terre a pris une autre importance. Elle est disputée par les pétroliers pour l'installation de leurs infrastructures et par les populations rurales pour l'exploitation agricole (Bouyo et Baohoutou, 2018).

Prélèvement, conservation et transport des échantillons d'eau

L'échantillonnage a été réalisé selon un dispositif complet randomisé avec trois traitements et dix répétitions chacun, soit au total trente échantillons. Les traitements concernent les eaux de puits, eaux de forages manuels et eaux de rivières. Les prélèvements ont été effectués dans chaque point d'eau selon Rodier *et al.* (2009). Le mode de prélèvement varie suivant l'origine de l'eau :

- Pour les eaux de puits, le prélèvement a été fait dans des conditions naturelles de prélèvement des consommateurs ;
- Afin d'assurer la représentativité des échantillons, le prélèvement des eaux de forages a été effectué après purge du cuvelage (Lallemand-Barrés, 1993 ; Vaute, 1998) d'au moins 5 minutes avant le prélèvement ;
- Pour les eaux de rivières, la bouteille est plongée à environ 50 cm de la surface, assez loin des rives, en dehors des zones des remous, en évitant la remise en suspension des matières dissoutes. Ces prélèvements ont été réalisés à la hauteur des agglomérations dans des endroits où les activités anthropiques sont fréquentes.

Les échantillons ont été prélevés dans de flacons en polyéthylène haute densité (PEHD) lavés avec une solution détergente à chaud et rincés avec de l'eau déionisée puis séchés. Les flacons destinés au prélèvement pour l'analyse des éléments minéraux ont été traités à l'acide nitrique environ N, puis rincés abondamment, égouttés, fermés mais non séchés. Au moment du prélèvement, pour l'analyse chimique, les flacons sont de nouveau rincés 3 fois avec de l'eau à analyser puis remplis jusqu'au bord. Pour les analyses bactériologiques, les flacons en verre sont stérilisés par la chaleur à l'autoclave à 120 °C pendant 1 heure (Rodier *et al.*, 2009). Ces échantillons d'eau ont été soigneusement étiquetés et conservés dans une glacière à une température de 4°C environ. Ils ont été ensuite acheminés au laboratoire accompagnés d'une fiche de prélèvement portant tous les renseignements nécessaires notamment l'origine et la date du prélèvement ainsi que les conditions sanitaires du point de prélèvement (El Ouali *et al.*, 2014).

Analyses des paramètres physico-chimiques et bactériologiques

Les paramètres physiques ont été déterminés *in situ* à chaque prélèvement. Le pH a été mesuré à l'aide du pH/°C mètre INSTRUCTIONS : WAG-WE30020 et la conductivité, par le TESTEUR Conductivité : WAG-WE30055. Ces deux appareils affichent d'une part, les résultats du pH et de la conductivité, et d'autre part ceux de la température. Les paramètres chimiques, en l'occurrence les ions nitrates, nitrites, chlorures, fluorures, ammonium, ont été analysés par la chromatographie ionique (Rodier *et al.*, 2009). Les anions ont été analysés par la norme NF EN ISO 10304-1 et les cations par la norme NF EN ISO 14911 (Rodier *et al.*, 2009).

Métaux lourds

Les métaux lourds comme le baryum, le calcium, le fer, le magnésium, le manganèse, l'aluminium, le chrome, le cuivre, le plomb et le zinc ont été analysés grâce à la spectrométrie d'émission optique ou ICP-optique (ICP-OES Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry) selon la norme NF EN ISO 11885 (Rodier *et al.*, 2009).

Dénombrement des bactéries par la méthode de la membrane filtrante

La méthode de la membrane filtrante de numération des bactéries présentes dans l'eau consiste à filtrer un volume de 100 mL d'eau de l'échantillon à travers une membrane millipore de pore de dimension 0,45 µm (Rodier *et al.* 2009). Sur chaque échantillon ont été testés la présence de *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* et streptocoques fécaux.

Le dénombrement d'*Escherichia coli* à la glucuronidase positive a été réalisé selon la norme française V08-053 (2002).

Le dénombrement de *Staphylococcus aureus* à la coagulase positive a été déterminé selon la norme française V08-057-1 (2004).

Le dénombrement de streptocoques fécaux a été effectué par la méthode NF T 90-416 (2008).

Résultats et discussion

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) a été réalisée sur une matrice de données composée de 30 lignes représentant les eaux de puits, de forages et de rivières et 21 colonnes représentant l'ensemble des variables physico-chimiques, bactériologiques et métaux lourds analysés. L'Analyse en Composantes Principales a été effectuée aussi séparément sur les paramètres physico-chimiques et bactériologiques (11 variables) ; les paramètres physico-chimiques et métaux lourds (18 variables) ; et enfin les paramètres bactériologiques et métaux lourds (13 variables).

Analyse en composantes principales des paramètres physico-chimiques et bactériologiques

Les corrélations entre les différentes variables mettent en évidence la similarité des phénomènes à l'origine de la mise en circulation des paramètres analysés dans les différentes sources d'eaux. 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 dans le tableau I. Ce tableau révèle la présence d'un premier ensemble de variables, constitué de variables corrélées entre elles. La conductivité électrique est négativement corrélée avec le pH ($p = 0,024$; $r = 0,170$) et la température ($p = 0,011$; $r = 0,211$). Les ions NO_3^- présentent une corrélation positive avec le pH ($p = 0,041$; $r = 0,141$). Les ions NO_2^- ont une bonne corrélation avec les ions NO_3^- ($p < 0,0001$; $r = 0,442$). Les ions NH_4^+ présentent une bonne corrélation avec les ions NO_3^- ($p = 0,001$; $r = 0,376$) et NO_2^- ($p = 0,001$; $r = 0,342$). *Staphylococcus aureus* est positivement lié à la température ($p = 0,004$; $r = 0,257$). *E. coli* est négativement corrélé au pH ($p = 0,001$; $r = 0,348$) à la température ($p = 0,014$; $r = 0,197$) et aux ions NO_3^- ($p < 0,0001$; $r = 0,501$), et positivement à la conductivité électrique ($p = 0,015$; $r = 0,015$). Les dernières corrélations concernent les streptocoques fécaux et le pH ($p < 0,0001$; $r = 0,556$), la conductivité électrique ($p = 0,031$; $r = 0,155$), les ions NO_3^- ($p < 0,0001$; $r = 0,477$) et *E. coli* ($p < 0,0001$; $r = 0,579$).

Tableau I. Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques et bactériologiques de l'eau

Variables	pH	T	CE	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	F ⁻	Staph	<i>E. coli</i>	Strepto
pH	1										
T	0,185	1									
CE	-	-	1								
NO ₃ ⁻	0,412*	0,459*		1							
NO ₂ ⁻	0,375*	0,209	-0,185		1						
NH ₄ ⁺	0,020	-0,157	0,329	0,665*		1					
Cl ⁻	0,050	-0,237	0,292	0,613*	0,585*		1				
F ⁻	0,007	0,199	-0,237	0,223	-0,030	0,280		1			
Staph	0,195	-0,170	0,213	0,035	0,137	0,325	-		1		
<i>E. coli</i>	-	-	0,439*	-	-0,329	-	-	0,038	0,201	-	
Strepto	0,590*	0,444*	0,708*	-	-0,275	-	-	0,317	0,217	-	1
	0,752*	-0,327	0,394*	-	-0,275	-	-	0,108	0,139	0,027	0,761*
		0,691*		0,194	0,082	0,012					

Les valeurs en étoile (*) sont significativement différentes de 0 à un niveau de signification alpha = 0,05.

Staph = *Staphylococcus aureus*, strepto = streptocoques fécaux.

Le cercle de corrélation (fig. 1) montre que onze variables prises en compte dans l'ACP contribuent à la définition du plan factoriel F1 x F2. L'inertie totale exprimée est de 51,11 %, le facteur F1 cumule 31,55 % de variance exprimée contre 19,56 % pour le facteur F2. Les ions NO₃⁻, NO₂⁻ et NH₄⁺ occupent le quart supérieur droit du plan factoriel, ces éléments ont donc des liaisons positives avec l'axe 1. *Staphylococcus aureus* et le pH occupent le quart inférieur droit du plan factoriel, ils ont donc une liaison forte négative avec l'axe 1. La conductivité électrique, *E. coli* et les streptocoques fécaux occupent le quart supérieur gauche. Ils ont une corrélation positive avec l'axe 2. La température et les ions Cl⁻ et F⁻ sont situés proches du centre du plan factoriel, donc n'expriment pas de ce fait une bonne corrélation avec les axes 1 et 2. L'inertie totale exprimée dans le cercle de corrélation est supérieure à celle rapportée par Lakhili *et al.*, (2015) qui est de 43,21 % dont 24,72 % pour l'axe F1 et 18,48 % pour l'axe F2. Il en est de même de celle d'Aka *et al.*, (2013) dont l'inertie totale exprimée est de 49,25%. Néanmoins, cette inertie est inférieure à celle rapportée par Lagnika *et al.*, (2014) qui est de 66,8% dans les eaux des nappes d'Altérites sous climat tropical humide dans le Département d'Abengourou au Sud-Est de la Côte d'Ivoire ; et d'Aguiza *et al.*, (2014) qui est de 53 %.

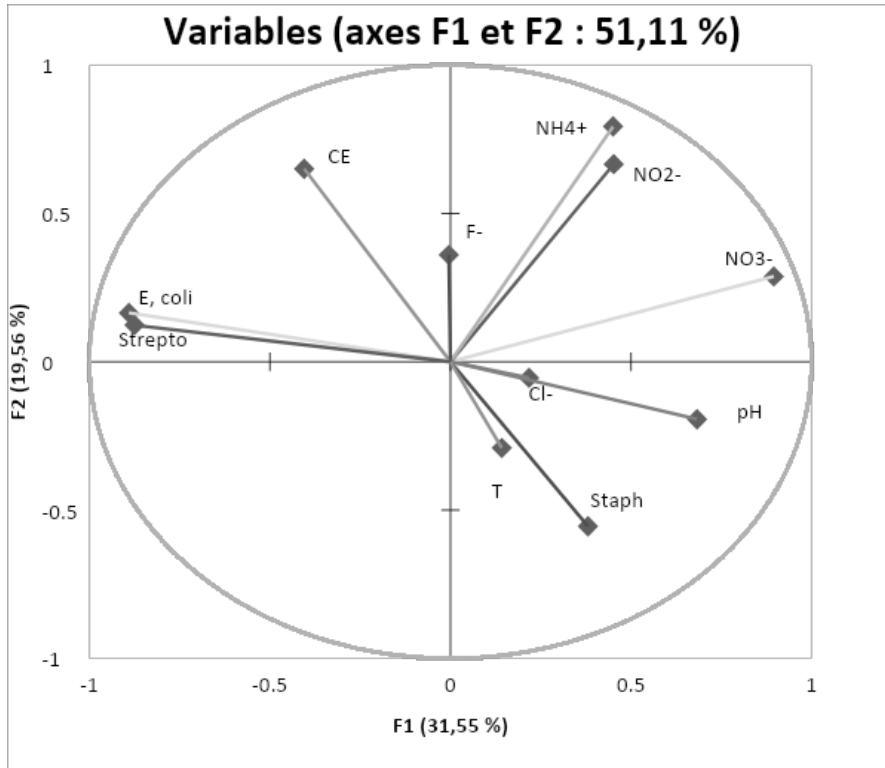


Figure 1. Cercle de corrélation des paramètres physico-chimiques et bactériologiques de l'eau
Staph = Staphylococcus aureus, strepto = streptocoques fécaux.

Analyse en composantes principales des paramètres physico-chimiques et métaux lourds

L'examen de la matrice de corrélation du Tableau II montre qu'il existe des corrélations très fortes entre les variables : Fe et Ba ($p < 0,0001$; $r = 0,892$), Cu et Ba ($p < 0,0001$; $r = 0,827$), Ba et Al ($p < 0,0001$; $r = 0,842$), Cu et Fe ($p < 0,0001$; $r = 0,937$), Pb et Ba ($p < 0,0001$; $r = 0,820$), Pb et Fe ($p < 0,0001$; $r = 0,959$), et Pb et Cu ($p < 0,0001$; $r = 0,915$). En plus de ces fortes corrélations, il existe bien des corrélations moyennement positives entre Ba et Mn, Ca et Al, Fe et Mg, Fe et Mn, Fe et Al, Mn et Cu, Al et Cu, Al et T, Al et Ce, Al et NO_3^- , NO_3^- et NO_2^- , et NO_3^- et NH_4^+ . Ce qui signifie que toutes les variables évoluent, en moyenne, dans le même sens (Chaouki *et al.*, 20). Les relations obtenues entre les différents paramètres physico-chimiques restent comparables à celles hautement significatives rapportées par Eblin *et al.* (2014) entre CE et Cl, SO_4 , THT, Ca, Mg, HCO_3^- ; entre pH et CE, THT, Ca, Mg ; entre Cl et SO_4 , Mg, HCO_3^- , NO_3^- , Na, K ; entre THT et Ca, Mg, HCO_3^- ; entre NO_3^- et PO_4 , Na, K dans la région d'Adiaké au sud-est côtier de la Côte d'Ivoire.

Tableau II. Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques et des métaux lourds de l'eau

Variab les	Ba	Ca	Fe	Mg	Mn	Al	Cr	Cu	Pb	Zn	pH	T	CE	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	F ⁻
Ba	1																	
	-																	
Ca	0,40 9*	1																
	-	-																
Fe	0,89 2*	0,42 2*	1															
	0,58 7*	0,00 0	0,61 8*	1														
Mg	0,62 3*	0,07 9	0,74 3*	0,42 5*	1													
	-	-	-	-	-													
Al	0,84 2*	0,68 1*	0,69 1*	0,31 4	0,23 8	1												
	-	-	-	-	-	-												
Cr	0,20 7	0,19 1	0,31 6	0,31 7	0,13 9	0,12 3	1											
	-	-	-	-	-	-	-											
Cu	0,82 7*	0,40 0*	0,93 7*	0,59 8*	0,73 6*	0,63 4*	0,33 2	1										
	-	-	-	-	-	-	-	-										
Pb	0,82 0*	0,41 0*	0,95 9*	0,52 0*	0,75 1*	0,62 3*	0,27 6	0,91 5*	1									
	-	-	-	-	-	-	-	-	-									
Zn	0,22 1	0,40 1*	0,17 1	0,24 2	0,20 2	0,42 3*	0,21 0	0,04 1	0,09 3	1								
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
pH	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1							

	7	0,30	0,24	0,25	0,50	0,40	0,26	0,29	0,28	0,49								
		2	3	7	1*	0*	0	2	7	0*								
		-	-	-	-	-	-	-	-	-								
T	0,51	0,50	0,38	0,01	0,16	0,65	0,03	0,47	0,42	0,11	0,18							
	7*	0*	8*	6	8	7*	0	1*	0*	1	5	1						
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
CE	0,43	0,48	0,31	0,16	0,11	0,61	0,11	0,29	0,28	0,59	0,41	0,45						
	9*	7*	9	6	7	3*	9	2	0	2*	2*	9*	1					
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
NO₃⁻	0,45	0,35	0,30	0,16	0,12	0,62	0,01	0,20	0,25	0,34	0,37	0,20	0,18					
	2*	3	6	2	8	6*	2	3	4	3	5*	9	5	1				
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
NO₂⁻	0,09	0,08	0,08	0,04	0,17	0,14	0,09	0,03	0,05	0,00	0,02	0,15	0,32	0,66				
	4	9	6	1	9	5	4	2	4	7	0	7	9	5*	1			
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
NH₄⁺	0,02	0,14	0,00	0,02	0,12	0,02	0,02	0,10	0,00	0,06	0,05	0,23	0,29	0,61	0,58			
	4	1	8	5	4	3	0	8	5	9	0	7	2	3*	5*	1		
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Cl⁻	0,23	0,06	0,22	0,19	0,15	0,16	0,12	0,13	0,25	0,23	0,00	0,19	0,23	0,22	0,03	0,28		
	2	3	4	8	3	8	7	3	2	6	7	9	7	3	0	0	1	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
F⁻	0,24	0,27	0,41	0,30	0,24	0,28	0,20	0,44	0,39	0,29	0,19	0,17	0,21	0,03	0,13	0,32	0,03	
	9	9	8*	4	5	4	0	6*	8*	0	5	0	3	5	7	5	8	1

Les valeurs en en étoile (*) sont significativement différentes de 0 à un niveau de signification alpha = 0,05.

Les valeurs propres des deux axes factoriels F1 et F2 et leur contribution à l'inertie totale déterminent 52,90 % de l'information totale à raison d'une inertie de 35,74 % et 17,17 % respectivement pour F1 et F2. Une approche typologique des différentes variables (F1 et F2) selon leurs affinités et regroupements sur les deux premières composantes principales est présentée dans la figure 2. Le quart supérieur droit est occupé par le Ba, la température et les ions NO_3^- . Par contre, le Fe, le Cr, le Mg, le Pb et le Mn occupent le quart inférieur droit. Le Facteur F2 est représenté positivement par le pH et les ions F^- . La conductivité électrique, l'Al, le Ca et le Zn représentent l'axe 2 au quart gauche inférieur. Le Cu et les ions NH_4^+ , NO_2^- et Cl^- , situés près du centre des facteurs F1 et F2 ne présentent pas une bonne corrélation.

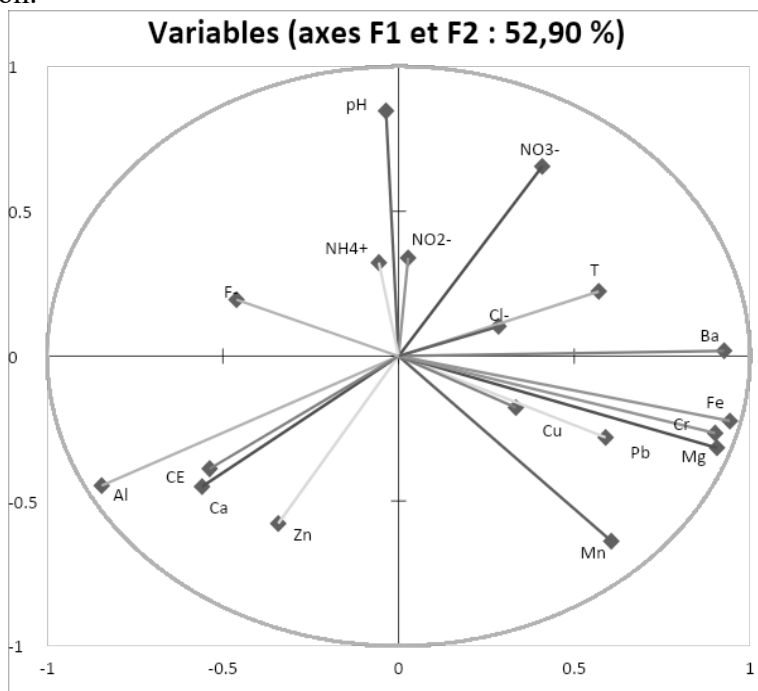


Figure 2. Cercle de corrélation des paramètres physico-chimiques et des métaux lourds de l'eau

Analyse en composantes principales des paramètres bactériologiques et métaux lourds

Dans le tableau (III) de matrice de corrélations entre les paramètres bactériologiques et les métaux lourds, les corrélations très significativement positives enregistrées sont : Fe et *Staphylococcus aureus* ($p < 0,0001$; $r = 0,802$), Fe et Ba ($P < 0,0001$; $r = 0,892$), Cu et *Staphylococcus aureus* ($P < 0,0001$; $r = 0,810$), Cu et Ba ($P < 0,0001$; $r = 0,827$), Cu et Fe ($P < 0,0001$; $r = 0,937$), Pb et *Staphylococcus aureus* ($P < 0,0001$; $r = 0,830$), Pb et Ba ($P < 0,0001$; $r = 0,820$), Pb et Fe ($P < 0,0001$; $r = 0,959$), et Pb et Cu ($P < 0,0001$; $r = 0,820$).

0,0001 ; $r = 0,915$). Les autres corrélations obtenues sont moyennement positives ou négatives.

Tableau III. Matrice de corrélation des paramètres bactériologiques et des métaux lourds de l'eau

Variables	Staph	<i>E. coli</i>	Strepto	Ba	Ca	Fe	Mg	Mn	Al	Cr	Cu	Pb	Zn
Staph	1												
<i>E. coli</i>	0,13	1											
Strepto	0,02	0,76	1										
Ba	0,69	0,42	0,20	1									
Ca	0,43	0,55	0,55	0,40	1								
Fe	0,80	0,21	0,03	0,89	0,42	1							
Mg	0,24	0,02	0,11	0,58	0,00	0,61	1						
Mn	0,63	0,28	0,50	0,62	0,07	0,74	0,42	1					
Al	0,54	0,72	0,56	0,84	0,68	0,69	0,31	0,23	1				
Cr	0,16	0,03	0,16	0,20	0,19	0,31	0,31	0,13	0,12	1			
Cu	0,81	0,16	0,12	0,82	0,40	0,93	0,59	0,73	0,63	0,3	1		
Pb	0,83	0,16	0,08	0,82	0,41	0,95	0,52	0,75	0,62	0,2	0,91	1	
Zn	0,17	0,59	0,49	0,22	0,40	0,17	0,24	0,20	0,42	0,2	0,04	0,0	1

Les valeurs en en étoile (*) sont significativement différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha = 0,05$.

Staph = *Staphylococcus aureus*, strepto = streptocoques fécaux.

L'analyse de la répartition des échantillons dans les plans factoriels permet de mettre en évidence les ressemblances et dissemblances existant entre les échantillons en fonction de leur composition élémentaire. Ainsi, les deux axes détiennent 72,69 % de l'information totale avec respectivement 48,15 % pour l'axe 1 et 24,53 % pour l'axe 2 (fig. 3). L'axe 1 est représenté par deux groupes variables. Le groupe 1 est constitué par le Fe, le Mg, *Staphylococcus aureus* et le Mn qui ont fortement corrélé à l'axe, et le Pb, le

Cu et le Cr qui ont une faible corrélation avec l'axe. Le groupe 2 est formé d'une seule variable, le Ba qui a bien corrélé avec l'axe. L'axe 2 est fortement représenté par un seul groupe de variables constitué des streptocoques fécaux, de Zn, d'*E. coli*, de Ca et d'Al.

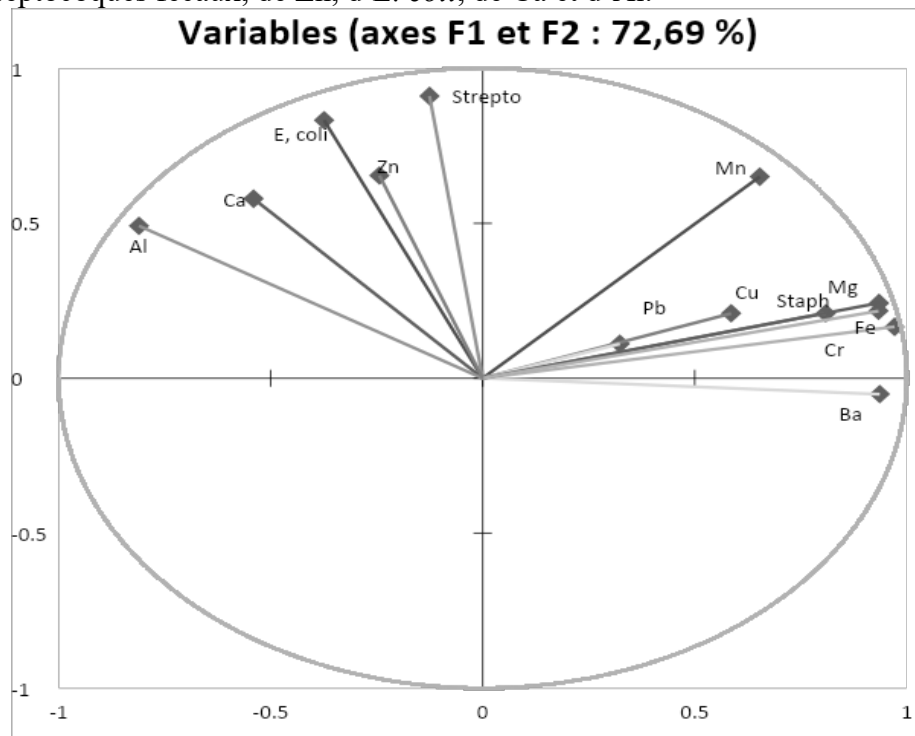


Figure 3. Cercle de corrélations de paramètres bactériologiques et de métaux lourds de l'eau.

Staph = *Staphylococcus aureus*, strepto = streptocoques fécaux.

Analyse en composante principale des paramètres physico-chimiques, bactériologiques et des métaux lourds

Dans le plan formé par les composantes principales 1 et 2 (fig. 4), les variables les plus corrélées à l'axe 1 sont : Mn, Cu, Pb, *Staphylococcus aureus*, Fe, Mg, Cr, Ba, Cl⁻, T°C, NO₃⁻, NO₂⁻, pH et NH₄⁺. Parmi ces variables, celles qui contribuent le plus à former l'axe 1 se répartissent en deux groupes différents : Le premier regroupe est formé de Mn, Cu, Pb, *Staphylococcus aureus*, Fe, Mg, Cr, Ba, qui sont fortement corrélés entre eux et positivement au F1, puisqu'ils définissent des vecteurs propres de même direction. Ces variables exprimeraient une contamination en métaux lourds des sources d'eau. Le deuxième groupe est constitué par Cl⁻, T°C, NO₃⁻, NO₂⁻, pH et NH₄⁺ qui sont corrélés négativement au F1. Ces variables décrivent une pollution de type organique et une eutrophisation des milieux aquatiques (Mounjid *et al.*, 2013). L'axe 2 est représenté positivement par les

streptocoques fécaux, *E. coli*, le Zn, le Ca, la CE et l'Al. Par contre, la variable F⁻ seule exprime une corrélation négative pour l'axe 2. Cet axe exprimerait d'une part une pollution fécale représentée par *E. coli* et les streptocoques, et d'autre part, une légère minéralisation indiquée par la conductivité électrique.

Une variable sera d'autant mieux représentée sur un axe que sa corrélation avec la composante principale correspondante est en valeur absolue proche de 1. Deux points très proches du cercle des corrélations, donc bien représentés dans le plan, seront très corrélés positivement entre eux. S'ils sont proches du cercle, mais dans des positions symétriques par rapport à l'origine, ils seront très corrélés négativement (Duby et Robin, 2006). Les corrélations entre ces variables sont d'autant plus fortes que lorsque les variables sont positionnées aux extrémités de l'axe défini par l'axe 1 (Diallo *et al.*, 2014).

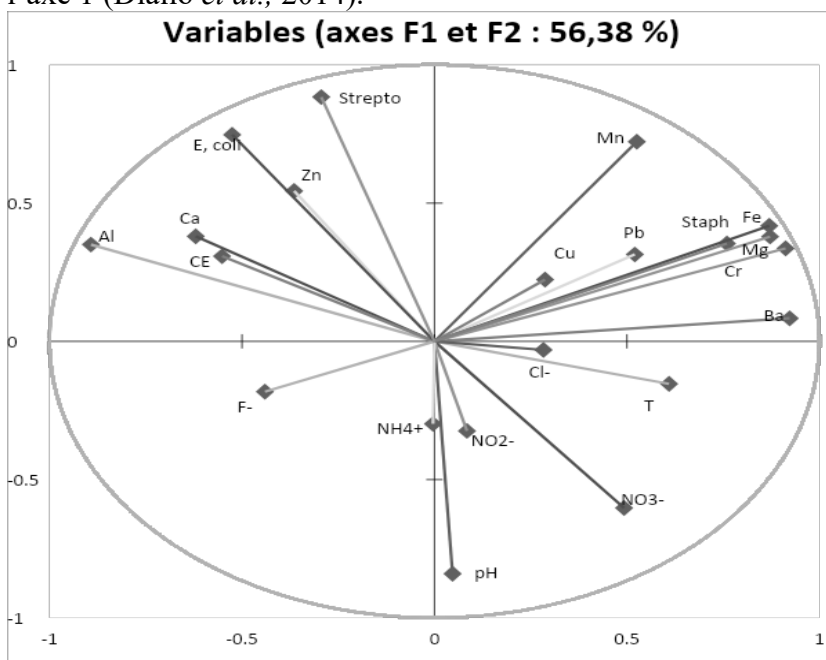


Figure 4. Cercle de corrélation des différents paramètres d'eau analysés
Staph = Staphylococcus aureus, strepto = streptocoques fécaux, CE = Conductivité électrique.

Conclusion

L'Analyse en Composantes Principales (ACP), réalisée sur les paramètres physico-chimiques et bactériologiques des eaux de puits, de forages et de rivières destinées à la consommation dans le bassin pétrolier de Doba, a permis de mettre en évidence les ressemblances et les dissemblances existant entre les échantillons en fonction de leur composition élémentaire. En effet, sur le cercle de corrélations de ces paramètres, les variables comme

le fer, le magnésium, le baryum, *staphylococcus aureus*, le manganèse, le streptococcus fécaux, *E. coli*, l'aluminium et le pH sont bien représentés dans le plan factoriel. Les corrélations hautement positives ont été enregistrées entre le fer et le baryum ($p < 0,0001$; $r = 0,892$) ; le baryum et le cuivre ($p < 0,0001$; $r = 0,827$) ; le fer et le cuivre ($p < 0,0001$; $r = 0,937$) ; le fer et le plomb ($p < 0,0001$; $r = 0,959$) ; le cuivre et le plomb ($p < 0,0001$; $r = 0,915$) et entre le plomb et le *staphylococcus aureus* ($p < 0,0001$; $r = 0,830$). Il faut aussi signaler que les corrélations entre le baryum et l'aluminium ($p < 0,0001$; $r = -0,842$) et entre le pH et les streptococcus fécaux ($p < 0,0001$; $r = -0,752$) sont significativement négatives. L'ACP est donc un outil qui offre la possibilité de simplifier l'étude des données chimiques en prenant en compte un certain nombre de variables.

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

Déclaration de financement : Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

References:

1. Aguiza Abai E., Ombolo A., Ngassoum M. B., et Mbawala A. Suivi de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux des cours d'eau de Ngaoundéré, au Cameroun. *Afrique Science*, 2014 ; 10 (4) : 135 – 145.
2. Aka N., Bamba S., Soro G., Soro N. Etude hydrochimique et microbiologique des nappes d'Altérites sous climat tropical humide : Cas du Département d'Abengourou (Sud-est de la Côte d'Ivoire). *Larhyss Journal*, 2013 ; 16 : 31-52.
3. ANTEA. Hydrological Study, Doba-Moundou region, Chad-Cameroon Pipe line proct, Exxon Chad Doba development project, A003098, 1995 ; 210 p.
4. Ayadi, I., H,Habib., D ,yasmine. International Water Ressources Association. XIII the World Water Conress 1. Montpellier, France. 2008 ; 4 p.
5. Barhoumi Y., Gaudremeau A. J., Gerbe B., Khamsing F., Rabatel Y. Eaux, ressources et menaces. 2004 ; 30 p.
6. Bennasser L. Diagnose de l'état de l'environnement dans la plaine du Gharb : suivi de la macro-pollution et ses incidences sur la qualité hydrochimique et biologique du bas Sebou. Thèse de doctorat d'état Es Science. Univ. Ibn Tofail; Kenitra, Maroc, 1997 ; 157 p.

7. Bouyo k.J. N., Baohoutou L. Mutations du système agraire dans le Département de la Nya, région du Logone Oriental au Sud du Tchad. *Annales de l'Université de Moundou*, 20184 ; (1), 87-110.
8. Chaouki I., Mouhir L., Fekhaoui M., El Abidi A., Bellaouchou A., El Morhit M. Application de l'analyse en composantes principales(ACP) pour l'évaluation de la qualité des eaux usées industriellesde Salam Gaz – Skhirat. *Journal of Materials and Environment Science*, 2015 ; 6 (2) : 455-464.
9. CIRAD, Plan de développement régional de la zone pétrolière (Tchad), rapport définitif, Ndjaména, CTNSC, 2005 ; 117 p.
10. Diallo A.D., Ibno Namr K., N'diaye A.D., Garmes H., Kankou M., Wane O. L'intérêt des méthodes d'analyses statistiques dans la gestion du suivi de la qualité physico-chimique de l'eau de la rive droite du Fleuve Sénégal. *Larhyss Journal*, 2014 ; 17 : 101-114.
11. Djémon M. Evolution de l'activité agricole dans le bassin pétrolifère de Doba (Tchad) de 2001 à 2010 : Cas des villages de Béro et de Mouarom. Mémoire de Master, 2010 ; 185 p.
12. Djéralar M. Vivre avec le pétrole. Etude sur les conditions de vie des villages en zone pétrolière de Doba au Tchad. Rapport. 2010 ; 90 p.
13. Duby C., Robin S. Analyse en Composantes Principales. Institut National Agronomique Paris – Grignon. Département O.M.I.P. 2006 ; 54 p.
14. Eblin S. G., Sombo A. P., Soro G., Aka N., Kambiré O., Soro N. Hydrochimie des eaux de surface de la région d'Adiaké (sud-est côtier de la Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences*, 2014 ; 75 : 6259– 6271.
15. El Ouali Lalami A., Zanibou A., Bekhti K., Zerrouq F., Merzouki M. Contrôle de la qualité microbiologique des eaux usées domestiques et industrielles de la ville de Fès au Maroc (Microbiological Control wastewater domestic and industrial city of Fes Morocco). *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 2014 ; 5 (S1) : 2325-2332.
16. Kadjangaba E., Guindja B., Bande F., Bongo D. Etude de la qualité des eaux souterraines et de leur aptitude à la consommation : cas de la ville de Moundou (sud-ouest du Tchad). *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*, 2023 ; 25-34.
17. Kassim C. Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau des puits de certains quartiers du district de Bamako. Université de Bamako. Thèse de doctorat en Pharmacie. 2005 ; 69 p.
18. Lagnika M., Moudachirou I., Jean-Pierre C., Valentin D., Nestor G. Caractéristiques physico-chimiques de l'eau des puits dans la commune de Pobé (Bénin, Afrique de l'Ouest). *Journal of Appelied Biosciences*, 2014 ; 79 : 6887-6897.
19. Lakhili Ferdaous Dr., Benabdelhadi Mohammed Ph., Bouderkha Nouzha Dr. Etude de la qualité physicochimique et de la contamination métallique

- des eaux de surface du bassin versant de Beht (Maroc). *European Scientific Journal*, 2015 ; 11 (11) : 132-147.
20. Mounjid J., Cohen N., Fadlaoui S., Belhouari A., Oubraïm S. Contribution à l'évaluation de la qualité physico-chimique du cours d'eau Merzeg (periurbain de Casablanca, Maroc). *Larhyss Journal*, 2013 ; 18 : 31-51.
 21. Ndahama N., Bagalwa M., Bayongwa C. Etude de la pollution organique totale et fécale dans les systèmes aquatiques de l'Est de la République Démocratique du Congo. *Afrique Science*, 2014 ; 10 (2) : 328-337.
 22. OMS. Directives des qualités pour l'eau de boisson (3^{ème} édition). 2004 ; 110 p.
Payment P., Waite M., Dufour A. Introducing parameters for the assessment of drinking water quality. London, UK : IWA Publishing. Pediatric Deaths From Community-Acquired, 1999.
 23. Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus*-Minnesota and North Dakota, 1997-1999. *Journal of American Medical Association*, 2003 ; 282 : 1123-1148.
 24. Rodier J., Legube B., Merlet N. L'analyse de l'eau. 9^{ème} édition. Dunod, Paris, 2009 ; 1526 p.
 25. Vaute L. Surveillance des eaux souterraines du bassin femfère lorrain en 1998. Rapport BRGM R 40789. 1998 ; 69 p.
 26. Young R. A., Haveman R. H. "Economic of Water Resources : A Survey". In Kneese A. V. and J. L. Sweeney. *Handbook of Natural Resource and Energy Economics*, 1985 ; 465-529.