



Evaluation hydro-chimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud-Ouest de Brazzaville, Congo

L. Matini^{1,*}, J.M. Moutou¹ et M.S. Kongo-Mantono²

¹Laboratoire de Chimie minérale et appliquée, Faculté des Sciences, U.M.NG. B.P 69
Brazzaville, Congo

²Département des Sciences Naturelles, E.N.S, U.M.NG., B.P 69 Brazzaville, Congo

* Correspondance, courriel : matinilaurent@yahoo.fr

Résumé

La qualité physico-chimique des eaux souterraines au sud-ouest de Brazzaville a été évaluée pour l'usage eau de boisson. Les eaux de 27 puits et 1 source ont été prélevées entre mars et avril 2007 (saison des pluies) puis analysées. 16 paramètres ont été déterminés dans les échantillons d'eau: pH, conductivité électrique (C.E), solides totaux dissous (TDS), Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , THT (dureté totale), TAC (titre alcalimétrique complet), fluorure (F^-), ortho phosphate (PO_4^{3-}), fer total (Fe_{tot}), manganèse total (Mn_{tot}), chrome (Cr(VI)). L'application des méthodes exploratoires multivariées (analyse factorielle et classification ascendante hiérarchique) a permis, respectivement : (i) d'identifier les paramètres les plus pertinents qui décrivent la qualité de ces eaux souterraines ; (ii) de montrer leur variabilité spatiale; (iii) de réduire le nombre de points de prélèvements d'eaux (puits et source) en groupes homogènes dans le cadre d'une étude possible du suivi temporel et spatiale de la qualité de ces eaux souterraines. Le pH variait entre 3,85 et 6,08, ce qui montre un caractère acide. 28,57% des eaux analysées avaient une conductivité électrique comprise entre 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 431 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les autres soit 71,43%, faiblement minéralisées avaient une conductivité inférieure à 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Une corrélation significative a été observée entre la conductivité électrique (C.E) et d'autres paramètres (TDS, Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Cr(VI), Mn_{tot}) exceptés Mg^{2+} et K^+ . Les concentrations en ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-}) étaient toutes inférieures à la valeur guide O.M.S respective. Ces eaux sont douces et d'une faible alcalinité essentiellement due aux ions bicarbonates (HCO_3^-). Le paramètre le plus déclassant

pour l'usage eau de boisson a été le chrome VI pour lequel 78,57% des points d'eaux analysées (y compris la source) avaient une teneur supérieure à 0,05 mg/L.

Mots-clés : *Eaux souterraines, chrome VI, analyses exploratoires multivariées, Brazzaville Congo.*

Abstract

Hydro chemical control of groundwater in an urban area, southwest of Brazzaville, Congo

The physicochemical quality of groundwater in the south-west of Brazzaville was evaluated for the water use of drink. Water of 27 wells and 1 spring were sampled between march and april 2007 (rain season) then analyzed. 16 parameters have been determined in water samples: pH, C.E (electric conductivity), total dissolved solids (TDS), calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), potassium (K^+), chloride (Cl^-), sulfate (SO_4^{2-}), nitrate (NO_3^-), total hardness (THT), total alkalinity (TAC), fluoride (F^-), ortho phosphates (PO_4^{3-}), iron (Fe_{tot}), manganese (Mn_{tot}), chromium (Cr(VI)). Multivariate statistical techniques (factor analysis and hierarchical classification analysis) used in this study were enable, respectively : (i) to identify the key parameters which describe groundwater quality; (ii) to characterize the spatial variability of groundwater quality data and (iii) to determine various parts of the shallow aquifer which could be grouped into homogeneous zones for monitoring of groundwater quality. pH values varied between 3.85 and 6.08, which shows an acid character. 28.57% of water samples analyzed have an electric conductivity ranging between 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and 431 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The others (71.43%) were slightly mineralized and have lower electric conductivity ($< 300 \mu\text{S}/\text{cm}$). A significant correlation was observed between electric conductivity (C.E) and others parameters (TDS, Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Cr(VI) , Mn_{tot}) excluded Mg^{2+} and K^+ . The concentrations in major ions were below the respective guidelines values for drinking water. Cr(VI) was the relegate parameter for the drinking use. Its content in 78.57% of water samples was greater than 0.05 mg/L.

Keywords : *groundwater, chrome VI, Multivariate statistical techniques, Brazzaville Congo.*

1. Introduction

Les eaux souterraines issues des nappes captives et superficielles sont des ressources en eau exploitées par l'homme pour divers usages [1]. La composition chimique d'une eau issue du milieu naturel est très variable. Elle dépend de la nature géologique du sol d'où elle provient et aussi des substances réactives qu'elle aurait pu rencontrer lors de l'écoulement. Ainsi la composition quantitative et qualitative de l'eau souterraine en matières en suspension et dissoutes, de nature minérale ou organique, détermine sa qualité [2]. Cependant cette qualité peut être altérée lorsque des substances extérieures entrent en contact avec la nappe aquifère. Tel est le cas des substances indésirables voire toxiques qui rendent l'eau souterraine impropre et toxique pour divers usages notamment pour l'usage eau de boisson. L'utilisation intensive des ressources naturelles et l'accroissement des activités humaines ont engendré de graves problèmes sur la qualité des eaux souterraines [3,4]. Dans les pays en développement, obtenir de l'eau saine pour la consommation humaine est devenu un sérieux problème du fait d'un manque de protection de l'environnement. L'approvisionnement non permanent en eau potable par le réseau de distribution nationale a conduit les populations à recourir aux eaux souterraines. La qualité des eaux souterraines du quartier "La Poudrière", situé au sud-ouest de Brazzaville (Congo), a été déterminée pour l'usage eau de boisson. L'étude a été faite en période de recharge des eaux souterraines qui correspond à la saison des pluies (mars – avril 2007), période pendant laquelle la contamination des eaux souterraines est la plus élevée à cause de l'infiltration des eaux de surface (eau de pluie, eau de rivière).

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude située dans le quartier La Poudrière à la périphérie de Brazzaville (Congo) s'étend de 526009,53 UTM à 526648,99 UTM de longitude Sud et de 9529382,91 UTM à 9530049,76 UTM de latitude Ouest. L'altitude moyenne dans cette zone est de 300 mètres. Le sol est issu de la série gréseuse de l'Inkisi et la végétation se présente comme une formation à tapis graminéen clairsemé avec une strate arbustive d'Euphorbiacées où domine *hymenocardia acida* [5]. Les précipitations sont modérées, entre 1100 et 1800 mm de pluie par an. La

température moyenne est de 25°C. Le climat de type bas-congolais présente deux saisons : une longue saison de pluies d'octobre à mai, marquée par une période de répit pluviométrique de janvier à février et une grande saison sèche de juin à septembre [5]. 28 points d'eau dont 27 puits domestiques et 1 source ont fait l'objet de cette étude. La localisation des puits et de la source est montrée à la **Figure 1**.

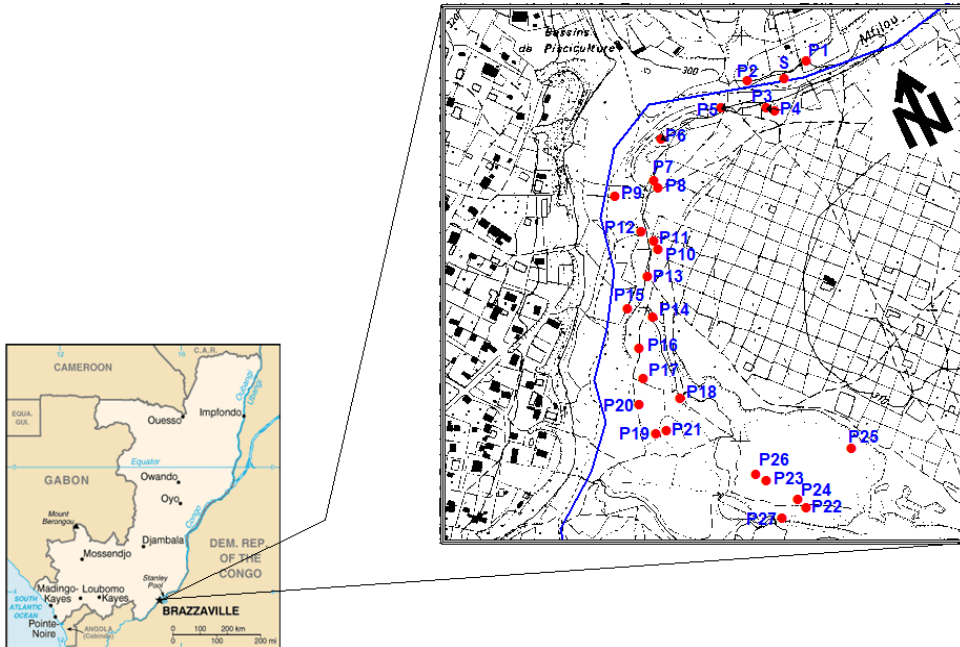


Figure 1 : Localisation des puits et source dans la zone d'étude

2-2. Procédure expérimentale

Les échantillons des eaux de puits et de source ont été prélevés en saison des pluies, période qui correspond à la recharge de la nappe phréatique par les précipitations. Les échantillons d'eau prélevés sont mis dans des bouteilles en polyéthylène de capacité 1,5 litres, préalablement lavées à l'acide nitrique 1M puis à l'eau distillée. Sur le terrain avant remplissage des bouteilles, celles-ci ont été lavées trois fois avec l'eau à prélever. Le remplissage des bouteilles a été fait à ras bord puis le bouchon vissé afin d'éviter tout échange gazeux avec l'atmosphère. Les échantillons d'eau ont été ensuite transportés dans une glacière à 4°C au laboratoire pour analyse dans l'heure qui suit le prélèvement. Divers paramètres physico-chimiques caractéristiques de la qualité des eaux souterraines ont été déterminés selon les méthodes APHA-AWWA-WPCF (1994) [6] de la manière suivante : le pH, la

conductivité électrique (C.E), les solides totaux dissous (TDS) ont été mesurés sur site à l'aide du multi paramètres Consort type C933. Ca^{2+} , Mg^{2+} , la dureté totale de l'eau (THt) ont été déterminés par titrage volumétrique à l'EDTA 0,01M. Le titre alcalimétrique complet (TAC) a été déterminé par titrimétrie sur le terrain à l'aide d'une solution H_2SO_4 0,01N. Les concentrations en ions chlorure (Cl) et sulfate(SO_4^{2-}) ont été déterminées respectivement par argentométrie et par la méthode néphélométrique. D'autres paramètres de la qualité des eaux souterraines ont été déterminés à l'aide d'un photomètre Palintest 7000 SE muni de filtres et de courbes de calibration préprogrammées. Les longueurs d'ondes opérationnelles varient entre 410 nm et 640 nm. Le mode opératoire suivi est celui du fabricant. Il s'agit du potassium (K), des nitrates (NO_3^-), fluorures (F), ortho phosphates (PO_4^{3-}), du fer total (Fe_{tot}), manganèse total (Mn_{tot}), chrome hexavalent ou Cr(VI). Les valeurs guides de l'O.M.S des paramètres physico-chimiques pour la qualité eau de boisson sont données dans le **Tableau 1** [7]. Celles-ci seront utilisées dans l'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines étudiées. L'analyse statistique des données obtenues a été effectuée avec le logiciel STATISTICA 7.1 (StatSoft, France 2006).

Tableau 1 : Valeurs guides pour la qualité de l'eau de boisson.

Paramètre	pH	CE	TDS	THt	TAC	Cl ⁻	SO_4^{2-}	NO_3^-
Valeur guide OMS	6,5-8,5	300	500	200	—	250	200	50
Paramètre	F ⁻	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	PO_4^{3-}	Fe_{tot}	Mn_{tot}	Cr (VI)
Valeur guide OMS	1,5	100	150	200	0,5	0,3	0,5	0,05

Exceptés pH, CE ($\mu S/cm$), THt et TAC en mg/L ($CaCO_3$), toutes les autres unités sont exprimées en mg/L.

3. Résultats et discussion

3-1. Evaluation de la potabilité des eaux

Dans le quartier "La Poudrière" situé au sud-ouest de Brazzaville, les eaux souterraines étudiées proviennent d'un aquifère sablonneux superficiel. Le niveau de l'eau par rapport à la surface du sol dans les différents puits et la source varie entre 0 et 1,54 mètres. Les valeurs des paramètres de la qualité des eaux qui ont été déterminées sont présentées dans les **Tableaux 2 et 3**.

Tableau 2 : Valeurs du pH, de la conductivité électrique et concentrations des solides totaux dissous (TDS), calcium, magnésium, potassium, chlorures, sulfates, nitrates

Code	pH	C.E	TDS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
S	3,90	93,92	49,88	4	12	3,2	19,53	2	0,56
P1	3,98	251,20	133,00	12	10	5,8	32,23	7	1,08
P2	4,00	104,92	55,54	8	12	2	18,10	4	3,90
P3	4,22	100,84	53,46	6	13	3,1	12,35	7	0,25
P4	5,21	116,44	61,96	8	14	4,1	19,89	10	0,66
P5	6,05	151,54	80,50	22	11	7	10,43	9	0,84
P6	5,69	355,80	190,00	22	12	10,5	14,98	7	23,20
P7	5,78	277,20	147,60	21	10,1	8,2	15,46	5	1,20
P8	5,55	232,60	123,20	14	7	4,9	29,00	7	0,84
P9	5,62	75,88	40,40	12	11	11	5,40	5	2,30
P10	5,45	234,20	124,80	20	9	9	15,11	7	0,99
P11	5,98	258,20	137,60	30	12	12	29,83	10	0,96
P12	5,12	304,60	161,60	27	10	4	14,27	8	0,87
P13	5,53	315,20	167,60	16	8	3,9	13,19	7	0,92
P14	5,09	333,80	177,40	20	9	4,01	17,86	9	1,00
P15	4,58	272,80	145,00	17	7	3,4	16,54	6	1,07
P16	3,85	300,20	159,40	14	6	4,7	14,39	10	1,10
P17	5,74	261,80	164,40	15	5	4,5	11,75	11	1,09
P18	4,41	302,80	161,00	17	5	4	11,87	10	1,10
P19	5,70	261,80	139,40	16	5	3,9	12,71	9	2,00
P20	5,12	297,20	157,80	18	6	4	24,50	7	0,84
P21	5,69	245,60	131,00	15	7	4,05	26,50	8	0,66

P22	5,37	299,00	158,80	17	6	5	27,00	10	0,85
P23	5,96	431,20	229,80	16	5	3,9	44,00	9	0,70
P24	5,78	318,60	169,40	18	6	4	25,00	7	0,82
P25	5,20	284,60	151,40	16	7	4,1	27,00	9	0,70
P26	5,59	255,60	135,40	15	5	4,7	31,80	10	0,89
P27	6,08	360,80	193,40	13	8	5	26,00	8	0,66

Exceptés pH et C.E (µS/cm), toutes les autres unités sont exprimées en mg/L.

Tableau 3 : *Valeurs de la dureté totale (THt), de l'alcalinité complète (TAC) et concentrations des fluorures (F⁻), ortho phosphates (PO₄³⁻), fer total(Fe_{tot}), manganèse total (Mn_{tot}) et chrome (VI).*

Code	THt	TAC	F ⁻	PO ₄ ³⁻	Fe _{tot}	Mn _{tot}	Cr (VI)
S	5	40	0,42	0,06	0,02	0,012	0,04
P1	20	5	0,29	0,53	0,21	<0,001	0,01
P2	10	5	0,19	0,36	0,36	0,010	0,02
P3	15	30	0,37	0,00	0,36	0,028	0,02
P4	30	15	0,58	0,13	0,43	0,023	0,09
P5	60	50	0,66	0,07	0,13	0,010	0,01
P6	55	30	0,50	0,06	0,19	0,020	0,00
P7	50	23	0,47	0,03	0,18	0,030	0,12
P8	15	13	0,4	2,20	0,06	0,040	0,10
P9	40	85	0,38	0,22	1,28	0,040	0,09
P10	49	70	0,40	0,05	0,13	0,050	0,10
P11	45	65	0,37	1,50	0,15	0,070	0,11
P12	40	50	2,90	0,97	3,95	0,050	0,13
P13	38	47	0,32	0,83	0,10	0,030	0,11
P14	37	51	0,37	0,79	0,12	0,060	0,15
P15	29	5	0,31	0,67	0,28	0,040	0,11
P16	20	8	0,29	0,55	0,46	0,050	0,13
P17	30	10	0,21	0,67	0,10	0,060	0,12
P18	28	12	0,23	0,7	0,04	0,050	0,13
P19	31	11	0,21	0,58	0,17	0,060	0,10
P20	27	10	0,22	0,14	0,16	0,040	0,12
P21	20	13	0,16	2,20	0,03	0,050	0,11
P22	30	12	0,11	2,28	0,15	0,040	0,10
P23	22	14	0,8	2,10	0,02	0,030	0,12

P24	29	13	0,70	1,99	0,15	0,040	0,13
P25	15	12	0,60	2,10	0,20	0,050	0,10
P26	14	14	0,50	2,34	0,04	0,030	0,12
P27	17	13	0,70	2,20	0,04	0,060	0,12

Exceptés Tht et TAC exprimés en mg/L de CaCO₃, toutes les autres unités sont en mg/L.

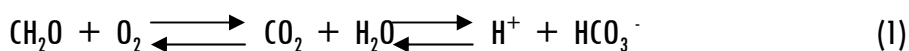
Tableau 4 : *Matrice de corrélation des différents paramètres de la qualité des eaux*

paramètre	pH	C.E	TDS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Tht	TAC	F ⁻	PO ₄ ³⁻	Fe _{tot}	Mn _{tot}	Cr (VI)
pH	1,00	0,36	0,37	0,53	-0,20	0,44	0,17	0,33	0,10	0,51	0,25	0,12	0,39	-0,08	0,36	0,31
C.E		1,00	1,00	0,54	-0,62	-0,03	0,41	0,42	0,17	0,15	-0,28	0,17	0,47	-0,06	0,41	0,52
TDS			1,00	0,53	-0,63	-0,03	0,39	0,45	0,17	0,15	-0,29	0,16	0,46	-0,07	0,43	0,53
Ca ²⁺				1,00	-0,14	0,51	0,02	0,37	0,18	0,72	0,34	0,38	0,13	0,28	0,44	0,34
Mg ²⁺					1,00	0,34	-0,28	-0,43	0,26	0,23	0,47	0,15	-0,55	0,21	-0,45	-0,63
K ⁺						1,00	-0,14	0,00	0,40	0,68	0,63	-0,05	-0,18	0,02	0,12	-0,14
Cl ⁻							1,00	0,18	-0,16	-0,42	-0,39	-0,02	0,70	-0,27	-0,05	0,14
SO ₄ ²⁻								1,00	-0,12	0,15	-0,19	0,02	0,38	-0,06	0,50	0,41
NO ₃ ⁻									1,00	0,35	0,04	-0,02	-0,24	-0,02	-0,22	-0,45
Tht										1,00	0,57	0,18	-0,38	0,18	0,10	-0,02
TAC											1,00	0,24	-0,31	0,32	0,13	-0,05
F ⁻												1,00	0,08	0,87	0,06	0,15
PO ₄ ³⁻													1,00	-0,11	0,36	0,45
Fe _{tot}														1,00	0,10	0,11
Mn _{tot}															1,00	0,76
Cr(VI)																1,00

Corrélations significatives ($p < 0,05$) en gras.

Le pH des eaux variait entre 3,85 et 6,08. Le pH représente l'intensité de l'acidité ou de l'alcalinité et mesure la concentration en ions hydronium dans l'eau. L'intervalle de valeurs de pH recommandé par l'O.M.S est 6,5 – 8,5. Le pH des eaux analysées était dans tous les cas plus petit que la limite inférieure de 6,5. Ce qui montre le caractère acide de ces eaux. Cette acidité proviendrait de la décomposition de la matière organique végétale très abondante dans la zone d'étude. La minéralisation de la matière organique présente dans le sol, sous l'action de l'oxygène, dégage du

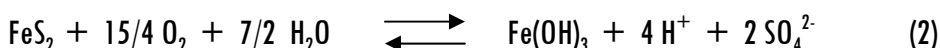
dioxyde de carbone lequel se dissout dans l'eau pour former l'acide carbonique suivant la réaction (1) :



Une forte association entre le pH et les cations Ca^{2+} ($r=0,53$, $p<0,05$), K^+ ($r=0,44$, $p<0,05$) a été observée. Le pH ne présentait pas une corrélation avec Fe_{tot} , Mn_{tot} et Cr(VI) qui dépendent plus des conditions oxydo-réductrices[7][8]. La conductivité électrique qui est une mesure de la capacité d'une solution aqueuse à conduire le courant électrique variait entre 75,88 $\mu\text{S/cm}$ et 431,2 $\mu\text{S/cm}$. Les eaux des puits P12, P13, P14, P18, P23, P24 et P27 avaient une conductivité électrique supérieure à la valeur guide O.M.S qui est de 300 $\mu\text{S/cm}$, soit 25% des points d'eaux analysées. Certains points d'eaux sont très faiblement minéralisés avec une C.E inférieure à 110 $\mu\text{S/cm}$.

La forte valeur de C.E au puits P23 (431,2 $\mu\text{S/cm}$) pourrait s'expliquer par l'infiltration des eaux usées dans la nappe phréatique. Les fosses septiques avoisinantes pourraient en être la source. Les solides totaux dissous (TDS) comme la conductivité électrique (C.E) décrivent les sels inorganiques présents en solution dans l'eau. Les TDS variaient entre 40,4 mg/L et 229,8 mg/L. La C.E et les TDS présentaient une très forte corrélation ($r = 1,00$, $p<0,05$). Une forte association a été constatée d'une part entre la C.E et les ions Cl^- ($r = 0,41$, $p<0,05$) et d'autre part entre la C.E et les ions ortho phosphate (PO_4^{3-}) ($r = 0,47$, $p<0,05$). Le titre alcalimétrique complet (TAC) dans les échantillons d'eaux analysées était essentiellement du aux ions bicarbonate (HCO_3^-). Le TAC se situait dans l'intervalle 5 mg/L de CaCO_3 à 85 mg/L de CaCO_3 ce qui se traduit par de très faibles concentrations en ions bicarbonates. De fortes associations ont été observées entre le TAC et Mg^{2+} ($r = 0,47$, $p<0,05$), TAC et K^+ ($r = 0,63$, $p<0,05$). La dureté totale de l'eau (Tht) est rattachée principalement à la quantité de calcium et de magnésium dans l'eau. Dans les échantillons d'eau, Tht variait entre 5 mg/L et 60 mg/L de CaCO_3 . Pour tous les points d'eaux étudiés, Tht était inférieur à la valeur guide OMS qui est de 200 mg/L de CaCO_3 . Selon la classification de Durfor et Becker [9], les eaux souterraines analysées sont douces puisque Tht se trouve dans l'intervalle 0 – 60 mg/L de CaCO_3 . Les concentrations en ion calcium (Ca^{2+}) dans les échantillons variaient entre 4 mg/L et 30 mg/L et celles des ions magnésium (Mg^{2+}) entre 5 mg/l et 14 mg/L. Ces très faibles concentrations s'expliquent par la nature du sol qui est sablonneux. Le calcium et le magnésium proviendrait de l'hydrolyse des minéraux silicatés présents dans ce sol. La dureté

des eaux analysées était significativement corrélée aux paramètres suivants : pH ($r = 0,51$, $p < 0,05$), Ca^{2+} ($r = 0,72$, $p < 0,05$), K^+ ($r = 0,68$, $p < 0,05$), TAC ($r = 0,57$, $p < 0,05$). Les concentrations en potassium (K^+) se situaient entre 2 mg/L et 12 mg/L. Toutes les concentrations en calcium, magnésium et potassium dans les échantillons d'eau étaient dans la limite permise pour l'eau de boisson. Les ions chlorure, sulfate et ortho phosphates sont des constituants minéraux qui peuvent altérer la qualité de l'eau souterraine lorsque leurs concentrations dépassent la valeur guide. Les ions sulfate (SO_4^{2-}) à des concentrations supérieures à la valeur guide dans l'eau de boisson peuvent provoquer des diarrhées chez l'être humain [10]. Les teneurs en ions chlorures des eaux souterraines sont généralement de l'ordre de 10 à 20 mg/L mais ils peuvent atteindre plus de 100 mg/L au contact de certaines formations géologiques. Leur origine peut-être naturelle, l'infiltration d'eaux marines en est un exemple. Les ions chlorures peuvent aussi être reliés aux rejets humains, en particulier l'urine et certains produits d'entretien. Les concentrations en ions chlorure (Cl^-) dans les eaux analysées variaient entre 5,4 mg/L et 44 mg/L. Elles sont toutes inférieures à la valeur limite acceptable pour l'eau de boisson. Celles des ions ortho phosphate se situaient entre 0 et 2,34 mg/L. 64,28% des points d'eaux étudiés ont présenté une concentration en PO_4^{3-} supérieure à la valeur limite de 0,5 mg/L. Les concentrations en ions sulfates étaient très faibles et se situaient entre 2 mg/L et 11 mg/L. Elles sont toutes dans la limite permise pour l'eau de boisson. Les ions SO_4^{2-} n'ont pas présenté de corrélation avec le calcium. Ils ne proviendraient pas de formations gypseuses. Leur origine probable pourrait être l'oxydation de la pyrite [11] (conditions oxydantes en saison des pluies) suivant la réaction (2) :



Une corrélation significative a été observée entre les ions Cl^- et les ions PO_4^{3-} ($r = 0,70$, $p < 0,05$). Ces phosphates pourraient provenir des eaux usées domestiques.

Les ions nitrate (NO_3^-) sont présents dans la nature où ils font partie du cycle de l'azote. Ils représentent la forme la plus soluble de l'azote. Principalement utilisés comme engrais inorganiques pour la croissance des plantes et la synthèse de composés azotés organiques, les nitrates en excès peuvent se retrouver rapidement dans les eaux souterraines [7]. Les déchets contenant de l'azote organique représentent aussi une source de nitrates obtenus à partir de différents processus bio-chimiques (ammonification et nitrification) [12]. Les concentrations en nitrates

dans les eaux analysées variaient entre 0,25 mg/L et 23,2 mg/L. Même si toutes ces concentrations sont inférieures à la valeur guide de l'O.M.S qui est de 50 mg/L pour l'eau de boisson, la concentration en NO_3^- dans le puits P6 (23,2 mg/L) suppose une contamination de l'eau du puits. En effet, la présence des activités d'aquaculture et d'élevage de volaille à moins de 6 mètres du puits P6 pourrait expliquer cette forte concentration en nitrates dans l'eau du puits. Les points d'eaux restants ont présenté des concentrations en nitrates inférieures à 5 mg/L. L'absence de fortes activités agricoles dans la zone d'étude nous permet de dire que la source naturelle probable des nitrates serait la décomposition de la matière organique végétale. Un des éléments les plus importants dans l'eau de boisson lié à la santé est le fluor. Celui-ci se présente dans l'eau sous forme d'ions fluorure (F^-). Le fluor dans l'eau provient principalement de la dissolution des minéraux naturels présents dans les roches et les sols avec lesquels l'eau réagit [13]. La fluorine (CaF_2), la cryolithe (Na_3AlF_6), le fluo apatite ($\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$) et les micas sont les principaux minéraux qui le contiennent. Les concentrations en F^- inférieures à 0,5 mg/L dans l'eau de boisson peuvent favoriser la carie dentaire [14]. A de très fortes concentrations (au-dessus de 1,5 – 2 mg/L), le fluor dans l'eau de boisson peut occasionner une fluorose dentaire ou osseuse [7], [15]. Dans les eaux analysées, les concentrations en F^- se situaient entre 0,11 mg/L et 2,9 mg/L. Seul le puits P12 a présenté une concentration en F^- qui dépassait la valeur guide O.M.S de 1,5 mg/L pour l'eau de boisson. 28,57 % des points d'eaux présentaient une concentration optimale en ions fluorures (entre 0,5 et 1,5 mg/L). 67,85 % des puits ont présenté une concentration en ions fluorures inférieure à 0,5 mg/L. Une corrélation significative a été observée entre F^- et Ca^{2+} ($r = 0,38$, $p < 0,05$) et une très forte association entre F^- et Fe_{tot} ($r = 0,87$, $p < 0,05$). La grande majorité des ions fluorures dans ces eaux serait donc sous forme complexée avec le fer. Les ions fluorures dans les eaux analysées pourraient provenir de la dissolution des silicates car F^- a un rayon ionique identique à celui de l'ion OH^- et peut donc se substituer à lui dans ces minéraux [14]. Les concentrations en fer total (Fe_{tot}) variaient entre 0,02 mg/L et 3,95 mg/L. Le fer est indispensable pour le corps humain mais de très fortes concentrations affectent les propriétés organoleptiques de l'eau et tâchent aussi le linge. La valeur guide O.M.S du fer total dans l'eau de boisson est 0,3 mg/L. 28,57% des points d'eaux analysés avaient une concentration en Fe_{tot} qui dépassait la valeur guide. Dans les eaux souterraines, le fer peut exister sous forme de fer ferreux (Fe^{2+}) soluble ou sous forme de fer ferrique (Fe^{3+}) insoluble pouvant être complexé, colloïdal ou précipité [16]. La forte association entre le fer et les ions fluorures montre la présence du fer complexé dans ces eaux souterraines. Les concentrations en manganèse total étaient par

contre très faibles. Celles-ci variaient entre $<10^{-3}$ mg/L et 0,07 mg/L. Sous des conditions oxydantes, le manganèse est moins mobile [14], ce qui pourrait expliquer les faibles concentrations en Mn_{tot} . Le chrome qui fait partie des substances dites toxiques peut se retrouver dans la nappe phréatique à cause des activités humaines telle que l'industrie textile. Les tanneries et explosifs constituent aussi une source anthropique du chrome ainsi que les déchets domestiques enfouis sous terre sans périmètre de protection. Le chrome présente deux états d'oxydation (+III et +VI) dont la forme la plus soluble, mobile et donc la plus toxique est le chrome hexavalent [14]. La valeur guide O.M.S du chrome hexavalent dans l'eau de boisson est 0,05 mg/L. Des concentrations supérieures à cette valeur guide dans l'eau de boisson peuvent entraîner des éruptions cutanées, des ulcères gastriques, un affaiblissement immunitaire, voire un cancer du poumon [17] par effet cumulatif. Les concentrations en chrome hexavalent dans les eaux analysées variaient entre 0 mg/L et 0,15 mg/L. 78,58 % des points d'eaux avaient une concentration en chrome hexavalent supérieure à la valeur guide. Des associations significatives ont été observées entre le chrome (VI) et d'autres paramètres de la qualité des eaux. Il s'agit de $Cr(VI) - C.E$ ($r = 0,52$ à $p < 0,05$), $Cr(VI) - SO_4^{2-}$ ($r = 0,41$, $p < 0,05$), $Cr(VI) - PO_4^{3-}$ ($r = 0,45$, $p < 0,05$) et une forte association avec Mn_{tot} ($r = 0,76$, $p < 0,05$). L'association du chrome avec les phosphates et le manganèse semblerait montrer une possible source anthropique.

3-2. Analyses exploratoires multivariées

L'analyse factorielle et la classification ascendante hiérarchique ont été appliquées aux paramètres de la qualité de l'eau considérés dans cette étude. Ces deux techniques statistiques peuvent être utilisées pour caractériser la qualité des eaux souterraines et concourent aussi à la planification d'un contrôle de suivi de la qualité des eaux [18]. L'analyse factorielle permet de comprendre la structure de corrélation des paramètres de la qualité des eaux et d'identifier les facteurs les plus importants qui contribuent à cette structure. Quant à la classification ascendante hiérarchique, cette méthode permet une réduction des données en les regroupant en classes dont les entités ont des propriétés similaires. Les valeurs des paramètres de la qualité des eaux souterraines étudiées ont été centrées et réduites. Cette transformation des données (distribution de moyenne 0 et d'écart-type 1) rend la comparaison des distributions de valeurs plus aisée entre les paramètres.

3-2-1. Analyse factorielle

L'extraction des facteurs a été effectuée par la méthode des composantes principales. 5 facteurs dont les valeurs propres sont supérieures à 1 ont été retenus suivant le critère de Kaiser [19]. Ils correspondent à 83,30% de la variance totale. La rotation Varimax normalisée a été appliquée sur ces facteurs afin de faciliter leur interprétation. Le **Tableau 5** présente les valeurs propres des cinq facteurs et leurs variances expliquées.

Tableau 5 : Valeurs propres et variance des facteurs

Facteur	Valeur propre		% Variance totale	
	individuel	cumulée	individuel	cumulée
1	4,922	4,922	30,76	30,76
2	3,705	8,627	23,16	53,92
3	1,991	10,618	12,44	66,36
4	1,524	12,142	9,53	75,89
5	1,185	13,327	7,41	83,30

Les poids factoriels des variables (**Tableau 6**) reflètent leurs corrélations avec les facteurs extraits.

Le premier facteur (F1) explique 30,76 % de la variance totale et contient Cr(VI), Mn_{tot}. Le chrome VI ne se présente pas naturellement dans les eaux souterraines. Il provient des activités anthropiques (rejets industriels ou domestiques). L'enfouissement anarchique des déchets dans la zone d'étude et l'action des eaux d'infiltration pourraient expliquer la présence de ces deux métaux dans les eaux étudiées. Le premier facteur traduit un impact anthropique. Le deuxième facteur (F2) contient les variables K⁺, THT et TAC. Il explique 23,16% de la variance totale et fait ressortir l'importance du potassium dans la dureté totale des échantillons d'eau analysés. La corrélation entre le potassium et l'alcalinité complète montre que le potassium se présente en grande partie sous forme de bicarbonate. Cette alcalinité étant essentiellement due aux ions bicarbonates (HCO₃⁻) car le pH est acide. Le troisième facteur (F3) explique 12,44% de la variance totale et contient le fer total, les ions fluorures, lesquels sont très fortement corrélés au fer total. Le troisième facteur traduit la spéciation du fluor dans les eaux étudiées. Le fer joue ici le rôle de fixateur par complexation des ions fluorures. Quant au quatrième facteur (F4), il contient les paramètres C.E et TDS. La variance expliquée devient faible par rapport

aux trois premiers facteurs. Elle est de 9,53%. F4 traduit la minéralisation de ces eaux souterraines. Enfin le cinquième facteur (F5) qui explique 7,41% de la variance totale contient les variables chlorure et ortho phosphate. F5 traduit l'impact des eaux usées domestiques sur la qualité des eaux souterraines étudiées.

Tableau 6 : poids factoriels des variables

Variable	Facteur				
	F1	F2	F3	F4	F5
pH	0,280	0,691	-0,046	0,191	0,360
CE	0,295	0,083	0,068	0,875	0,259
TDS	0,318	0,081	0,051	0,879	0,238
Ca ²⁺	0,264	0,680	0,310	0,454	0,002
Mg ²⁺	-0,616	0,286	0,199	-0,506	-0,198
K ⁺	-0,144	0,896	-0,091	-0,047	-0,059
Cl ⁻	-0,034	-0,134	-0,086	0,208	0,908
SO ₄ ²⁻	0,541	0,130	-0,081	0,368	0,123
NO ₃ ⁻	-0,617	0,326	-0,075	0,497	-0,220
THt	-0,018	0,827	0,117	0,206	-0,385
TAC	0,028	0,710	0,265	-0,434	-0,218
F ⁻	0,006	0,084	0,967	0,098	0,086
PO ₄ ³⁻	0,375	-0,074	0,004	0,212	0,823
Fe _{tot}	0,040	0,048	0,945	-0,069	-0,175
Mn _{tot}	0,840	0,223	0,039	0,170	-0,028
Cr(VI)	0,876	-0,010	0,136	0,217	0,120

En gras, poids marqués > 0,700.

3-2-2. Classification ascendante hiérarchique (CAH)

L'évaluation de la qualité des eaux souterraines étudiées a été aussi faite en regroupant les points d'eaux prélevés (puits et source) en des zones homogènes. Cette classification permet de réduire le nombre de sites de prélèvements dans le cas d'un programme de suivi temporel. La **Figure 2** présente les résultats de la classification des points de prélèvements en zones homogènes.

Quatre classes se distinguent dans cette classification : C1, C2, C3 et C4. Dans celles-ci des associations entre puits sont évidentes. Tel est le cas de P17 et P19, P16 et P18, P15 et P20 dans la classe C1; des puits P8 et P21, P22 et P26, P24 et P27 dans la classe C2; P5 et P9, P7 et P10, P13 et P14 dans la classe C3 ; la source S et P2, P1 et P4 dans la classe C4. Les associations dans les classes C1 et C2 sont sensiblement au même niveau significatif.

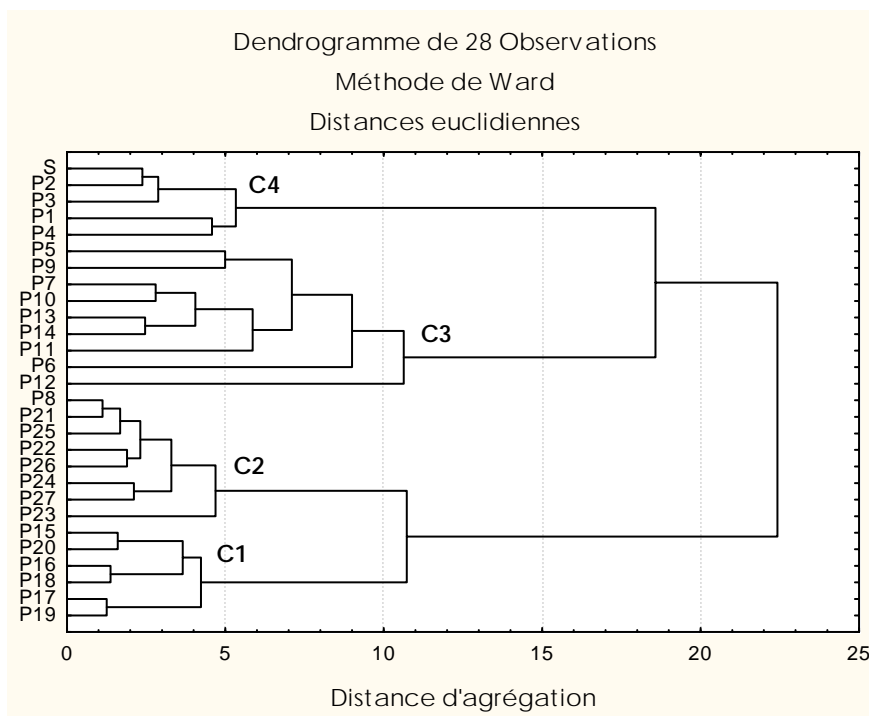


Figure 2 : *Classification des puits et source*

4. Conclusion

Cette étude a montré que les eaux souterraines du quartier la Poudrière, situé au sud-ouest de Brazzaville, n'étaient pas aptes à être consommées comme eau de boisson. Les paramètres pH, ortho phosphate (PO_4^{3-}) et chrome VI déclassent ces eaux souterraines de l'utilisation eau de boisson. Le chrome qui est un élément indésirable et toxique est présent dans 96,43% des points d'eaux (y compris les eaux de la source). Malheureusement les populations de cette zone utilisent ces eaux

souterraines comme eau de boisson. Ceci représente un problème grave de santé publique. Le chrome VI a été placé dans le groupe des éléments chimiques cancérigène pour l'homme. L'application des méthodes exploratoires multivariées (analyse factorielle et classification ascendante hiérarchique) a permis d'identifier les paramètres les plus importants qui décrivent la qualité de ces eaux souterraines et aussi la réduction du nombre des points de prélèvements dans le cadre d'une étude possible du suivi temporel et spatial de leur qualité. L'analyse factorielle a donc montré que la variabilité de la qualité des eaux souterraines étudiées dépendait de 5 facteurs : l'impact des activités anthropiques, l'alcalinité, la minéralisation, la spéciation du fluor et l'impact des eaux usées domestiques. Ces cinq facteurs représentent 83,3% de la variabilité de la qualité des eaux souterraines étudiées. Ils se distinguent respectivement par les paramètres $Mn_{tot} + Cr(VI)$, $TAC + THT$, $Fe_{tot} + F^-$, $C.E, Cl^- + PO_4^{3-}$. Ainsi cinq paramètres suffisent pour un programme de surveillance régulière de la qualité de ces eaux de puits. Ce sont : $Cr(VI)$, TAC , $C.E$, F^- et PO_4^{3-} . Les autres paramètres qui leurs sont corrélés peuvent être déterminés à partir d'une régression linéaire simple. La classification ascendante hiérarchique de la variabilité spatiale a mis en évidence quatre classes de points de prélèvements dans la zone d'étude. Ainsi une étude de contrôle de la qualité de ces eaux souterraines pourrait se faire avec un nombre plus réduit des points de prélèvements.

Références

- [1] - B.G. PRASAD, T.S. NARAYANA, « Subsurface water quality of different sampling stations with some selected parameters at Machilipatnam Town». *Nat. Env. Poll. Tech.* 3 (1), (2004) 47-50
- [2] - P. JAIN, J.D. SHARMA, D. SOHU, P. SHARMA, «Chemical analysis of drinking water of villages of Sanganer Tehsil, Jaipur District». *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, Vol. 2, N°4(2005) 373-379
- [3] - S.S.D. FOSTER, «Groundwater for development — an overview of quality constraints». In H. Nash & G.J.H. Mc Call (Eds.), *Groundwater quality. 17 th Special Report*, London United: Chapman and Hall, (1995) 1-3
- [4] - S. Mor, K. Ravindra, R.P. DAHIYA, A. CHANDRA, «Leachate characterization and assessment of groundwater pollution near municipal solid waste landfill site». *Environ Monit Assess*, N°118, (2006) 435-456

- [5] - X. KINGA-MOUNZEO, «Transport particulaire actuel du fleuve Congo et de quelques affluents : Enregistrement quaternaire dans l'éventail détritique profond (Sédimentologie, Minéralogie, Géochimie)». Thèse de Doctorat de l'Université de Perpignan, (1986)
- [6] - APHA-AWWA-WPCF, «Standard methods for the examination of water and wastewater». American Public Health Association, 15th edn. (1994)
- [7] - O.M.S, «Directives de qualité pour l'eau de boisson». 2nd Ed., Vol 2, Critères d'hygiène et documentation à l'appui, (2000), 1050p
- [8] - O. ATTEIA, «Chimie et pollution des eaux souterraines». Ed. Lavoisier, TEC&DOC, (2005) 398p
- [9] - C.N. DURFOR, E. BECKER, «Public water supplies of the 100 largest cities in the US». US-Geological Survey Water Supply Paper, (1964) 1812, 364
- [10] - [CDC-EPA, «Health effects from exposure to high levels of sulfate in drinking water study». EPA 815-R-99-001, January 1999
- [11] - O. BANTON, M. LUMONY BANGOY, «*Hydrogéologie – Multiscience environnementale des eaux souterraines*». Presses de l'Université du Québec/AUPELF, (1997) 159-160
- [12] - OFFICE OF DRINKING Water, «Estimated national occurrence and exposure to nitrate and nitrite in public drinking water supplies». US Environmental Protection Agency, (1987)
- [13] - [K. RAVINDRA, V.K. GARG, «Hydro-chemical survey of groundwater of Hisar City and assesment of defluoridation methods used in India». Environ Monit Assess, N°132, (2007) 33-43
- [14] - S. JORDANA, E. BATISTA, «Natural groundwater quality and health». *Geologica Acta*, Vol.2, N°2, (2004) 175-188
- [15] - I.D. BROUWER, A. DE BRUIN, O.A. DIRKS, J. HAUTVAST, «Unsuitability of WHO guidelines for fluoride concentration in drinking water in Senegal». *Lancet*, 1, (1988) 223-225
- [16] - N. KOTHARI, «Groundwater, iron and manganese: an unwelcome trio». *Water/Engineering & Management*, Vol.135, N°2, (1988) 25-26
- [17] - CENTRE INTERNATIONAL DE RECHERCHE SUR LE CANCER, «Chromium, Nickel and Welding». Lyon, Monographie du CIRC sur les risques de cancérogénicité pour l'homme, Vol.23, (1980) 205-323
- [18] - X. ZENG, T.C. RASMUSSEN, «Multivariate statistical characterization of water quality in lake Lanier, Georgia, USA». *J. Environ. Qual.*, (2005) 34: 1980-1991
- [19] - H.F. KAISER, «The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis». *Psychometrical*, 23, (1958) 187-200