

Hydrogéochimie et contamination des eaux souterraines de la partie urbaine du bassin versant de la N'djili à Kinshasa

Daniel NZOMBA

*Institut National du Bâtiment et des Travaux Publics, Section Bâtiment et Travaux Publics,
BP 4731 Kinshasa - Ngaliema, RDC*

(Reçu le 07 Mars 2023 ; Accepté le 17 Avril 2023)

* Correspondance, courriel : nzombadaniel7@gmail.com

Résumé

La présente étude avait pour objectif de caractériser les eaux souterraines du bassin versant de la rivière N'djili dans sa partie urbaine et d'en évaluer la contamination. Les paramètres physico-chimiques tels que le pH, la Température, la Conductivité, les Solides totaux dissous (TDS), la Turbidité NTU, l'alcalinité (TAC), le Bicarbonate (HCO_3), le Sulfate (SO_4), le Chlorure (Cl^-), le Nitrate (NO_3), le Sodium (Na), le Potassium (K), le Calcium (Ca), le Magnésium (Mg), la dureté totale (THT) ainsi que les éléments traces métalliques tels que : le Plomb (Pb), l'Arsenic (As), le Cadmium (Cd) ont été dosés sur 14 échantillons d'eaux souterraines. Les méthodes hydrochimiques et statistiques (analyse en composante principale, ACP et diagramme de Piper) ont été utilisées pour le traitement des résultats des analyses physico-chimiques. La classification des eaux souterraines selon Piper a montré que deux faciès caractérisaient ces eaux : le faciès chlorurée et sulfatée calcique ainsi que le faciès chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique. Les résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines ont démontré que la majorité de ces eaux présentait des dépassements en nitrate, en éléments traces métalliques (Pb, Cd, As) des lignes directrices de l'OMS. Les sources des pollutions et leurs mécanismes ont été déterminés. L'analyse en composante principale (ACP) a montré que la minéralisation globale de ces eaux provenait d'une part des activités anthropiques (NO_3 , Pb, Cd, As) et d'autre part de l'interaction eau-roche (Ca).

Mots-clés : *Bassin de la rivière N'djili, ACP, diagramme de piper, hydrochimie.*

Abstract

Hydrogeochemistry and groundwater contamination of the urban part of the N'djili watershed in kinshasa

The objective of this study was to characterize the groundwater of the N'djili river watershed in its urban part and to assess its contamination. The physico-chemical parameters such as pH, Temperature, Conductivity, Total Dissolved Solids (TDS), Turbidity NTU, Alkalinity (TAC), Bicarbonate (HCO_3), Sulfate (SO_4) Chloride (Cl^-), Nitrate (NO_3), Sodium (Na), Potassium (K), Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Total Hardness (THT) as well as metallic trace elements such as : Lead (Pb), Arsenic (As), Cadmium (Cd) were measured on 14 groundwater samples. Hydrochemical and statistical methods (principal component analysis, PCA and Piper diagram) were

used to process the results of the physicochemical analyses. The Piper classification of groundwater showed that two facies characterized the water: the chloride and sulphate calcic facies and the chloride sodium and potassium or sulphate sodium facies. The results of the physico-chemical analyses of the groundwater showed that the majority of these waters exceeded the WHO guidelines for nitrate and trace metals (Pb, Cd, As). The sources of pollution and their mechanisms were determined. The principal component analysis (PCA) showed that the global mineralization of these waters was due to anthropic activities (NO₃, Pb, Cd, As) and to water-rock interaction (Ca).

Keywords : *N'djili river basin, ACP, piper diagram, hydrochemistry.*

1. Introduction

Le bassin versant de la rivière N'djili a connu ces dernières années une croissance démographique et industrielle importante. En 2002, la population était estimée à environ 2 660 724 habitants, soit une densité de 3 138 hab/Km² [1]. En 2021, la population était estimée à environ 4 682 874 habitants, soit une densité de 7 493 hab/Km². De 2002 à 2021, le bassin versant a connu une croissance démographique estimée à environ 176 % laquelle a eu pour conséquence directe l'urbanisation chaotique sur toute l'étendue du bassin versant mais aussi la consommation excessive de l'eau. L'urbanisation chaotique a occasionné la multiplication des activités anthropiques, l'aménagement précaire des réseaux des collectes et des rejets des eaux usées, l'auto-conception des décharges publiques. Ceci a impliqué la détérioration excessive de la qualité de l'eau au niveau de la rivière N'djili et ses affluents mais aussi sur toute l'étendue du bassin versant et les différents aquifères. La rivière N'djili est contaminée en certains éléments traces métalliques [2]. Il est aujourd'hui admis par certains auteurs [3 - 11] que les causes de cette pollution sont : l'évacuation des boues de purification par l'usine de traitement d'eau installée sur la rivière, le rejet d'effluents industriels, le rejet des déchets domestiques et des déchets hospitaliers non-traités, le mélange des eaux de la N'djili avec celles du Fleuve Congo polluées en Hg, Pb et Cd au niveau du pool malebo, la minéralisation des plantes poussant dans les marécages, enrichis en éléments traces métalliques par bioaccumulation, les pluies chargées de certains métaux et métalloïdes polluant l'air à Kinshasa (As, Pb et Ni) et l'utilisation de pesticides. La pollution de la rivière N'djili a occasionnée la pollution de l'aquifère [12]. Plusieurs analyses ont montré que les teneurs en Cd, Cr, Co, Ni et Cu dans l'eau des puits utilisée par des maraichers pour l'arrosage dans le pool malebo dépassaient aussi les limites fixées par la FAO [12]. La connaissance du bassin versant de la N'djili est assez complète bien que d'autres aspects scientifiques n'aient pas été abordés. Les études faites ont été exclusivement centrées sur la rivière N'djili sans trop faire mention des autres affluents de la rivière qui contribuent en grande partie dans la pollution. La majorité de ces études a mis plus l'accent sur la pollution des eaux superficielles sans s'intéresser en profondeur de l'impact de cette pollution au niveau des eaux souterraines. Ainsi, le présent travail a évalué les paramètres physico-chimiques, les éléments majeurs, les éléments traces métalliques des eaux souterraines pour mieux connaître la qualité des eaux souterraines consommées par la population habitant dans ce bassin versant.

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation de la zone d'étude

Le bassin versant de la rivière N'djili, présenté dans la *Figure 1*, situé dans la partie occidentale de la République Démocratique du Congo couvre une superficie d'environ 2000 Km² [1]. Il s'étend de la province du Kongo-Central (partie rurale) jusqu'à Kinshasa (partie urbaine), entre 15°9' et 15°39' de longitude Est et

4°22' et 4°59' de latitude Sud [1]. Il est délimité : à l'Ouest par le bassin du Fleuve Congo ; au Sud et au Sud-Ouest par le bassin versant de la rivière Inkisi ; à l'Est par le bassin versant de la N'sele [1]. Du point de vue géomorphologique, le bassin versant sous étude présente deux ensembles géomorphologiques : la zone de la plaine et la zone des collines [1]. La zone de la plaine est composée des surfaces plus basses, des marécages et des terrasses [1]. Ces surfaces résultent de l'érosion pluviale [1]. La zone des collines englobe en son sein les collines de Kimbanseke, de Kisenso jusqu'aux environs de Dingi – Dingi [1]. Les sols sont essentiellement constitués des sables fins plus ou moins argileux, des sables moyens et des sables grossiers [1].

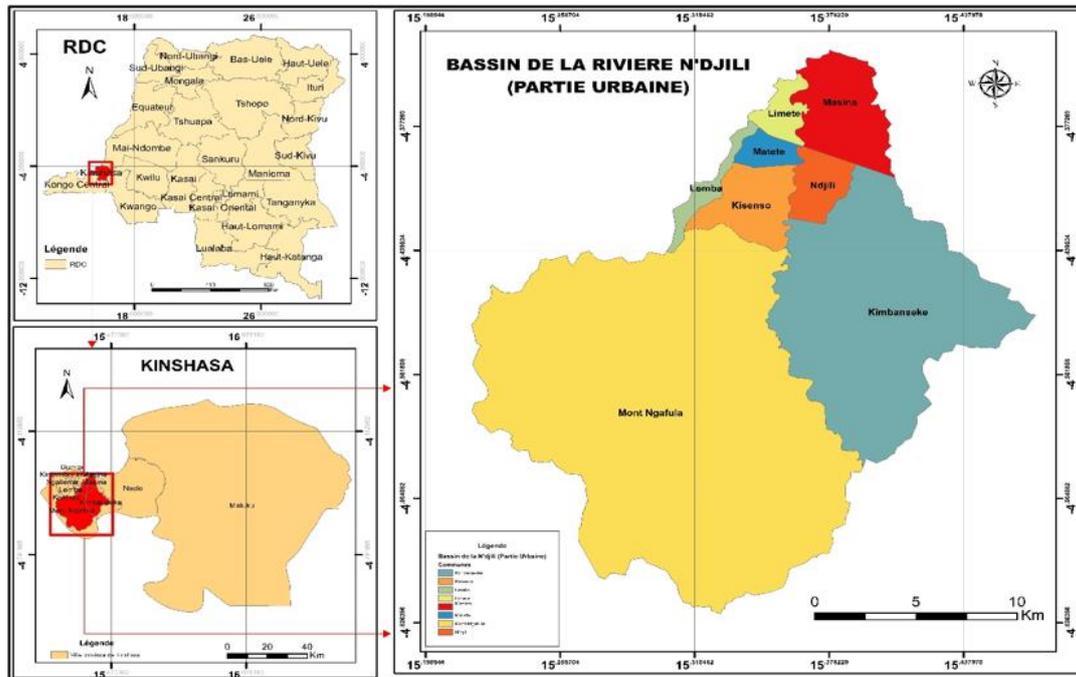


Figure 1 : Localisation du bassin de la N'djili (Partie Urbaine)

2-2. Cadre géologique de la zone d'étude

Le contexte géologique dans lequel se trouve le bassin versant de la rivière N'djili correspond au contexte géologique de Kinshasa (Figure 2) [13]. Néanmoins, le bassin versant sous étude présente des caractéristiques spécifiques. Dans la zone de plaine (Matete, N'djili, Masina, Lemba, Limete), les sables fins argileux bruns ou jaunes, les sables blancs fins ou moyens et les argiles constituent des formations superficielles tandis que les sables d'alluvions plus anciennes, les sables grossiers et argiles, les colluvions d'origine éolienne plus tardive (sables grossiers moyens), le débris ou base de grès tendre et le grès polymorphes constituent des formations profondes [13]. Dans la zone collinaire (Kisenso, Kimbanseke, Mont-Ngafula), le sable fin argileux jaunes à bruns et le sable fin moyens blancs constituent des formations superficielles alors que le sable grossier et le grès polymorphes constituent des formations profondes [13].

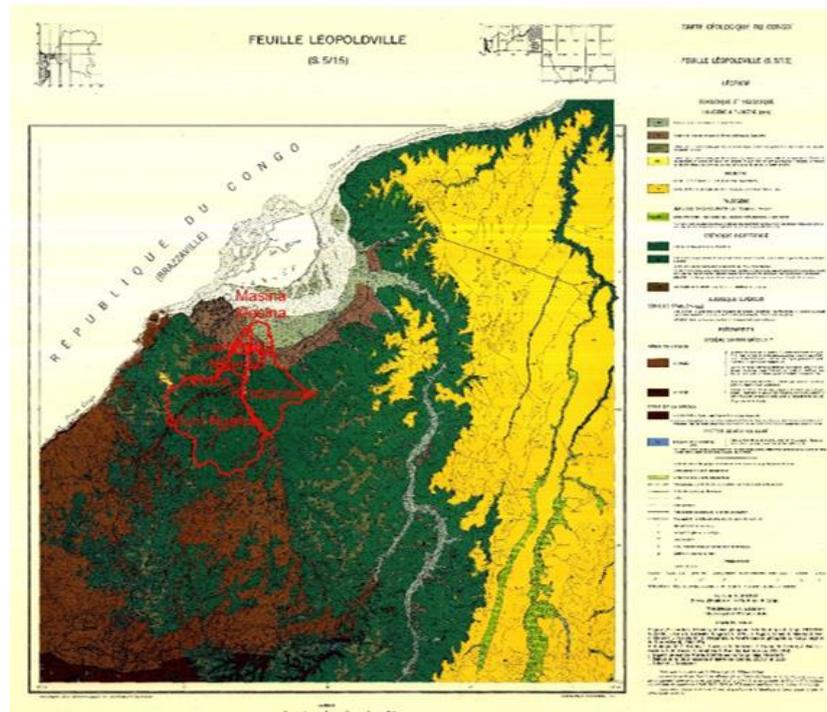


Figure 2 : Carte géologique de Kinshasa avec le bassin versant de la N'djili Partie urbaine (Egoroff, 1955)

2-3. Méthode d'étude hydrochimique

L'approche méthodologique utilisée a consisté à la caractérisation de la composition de l'eau en utilisant les analyses chimiques élémentaires (détermination de la concentration massique des différents solutés traduite sous forme de teneurs en ions pour les éléments majeurs) et les analyses physico-chimiques (méthode par spectrométrie, électrodes pour le pH, la conductivité, la salinité, la turbidité, etc.).

2-3-1. Méthode d'échantillonnage

L'échantillonnage des eaux du bassin de la N'djili a porté sur les eaux de sources, les eaux de puits, les eaux de forage. Au total quatorze (14) points de prélèvement ont été choisis (**Tableau 1 et Figure 3**). Ce quatorze (14) points de prélèvement sont répartis comme suit : sept (7) forages, six (6) puits, une (1) source. La campagne d'échantillonnage s'est déroulée au mois de septembre 2021 pendant la saison des pluies. Les lieux des prélèvements d'échantillons ont été enregistrés à l'aide d'un GPS portatif de la marque GARMIN 62S (**Tableau 1**).

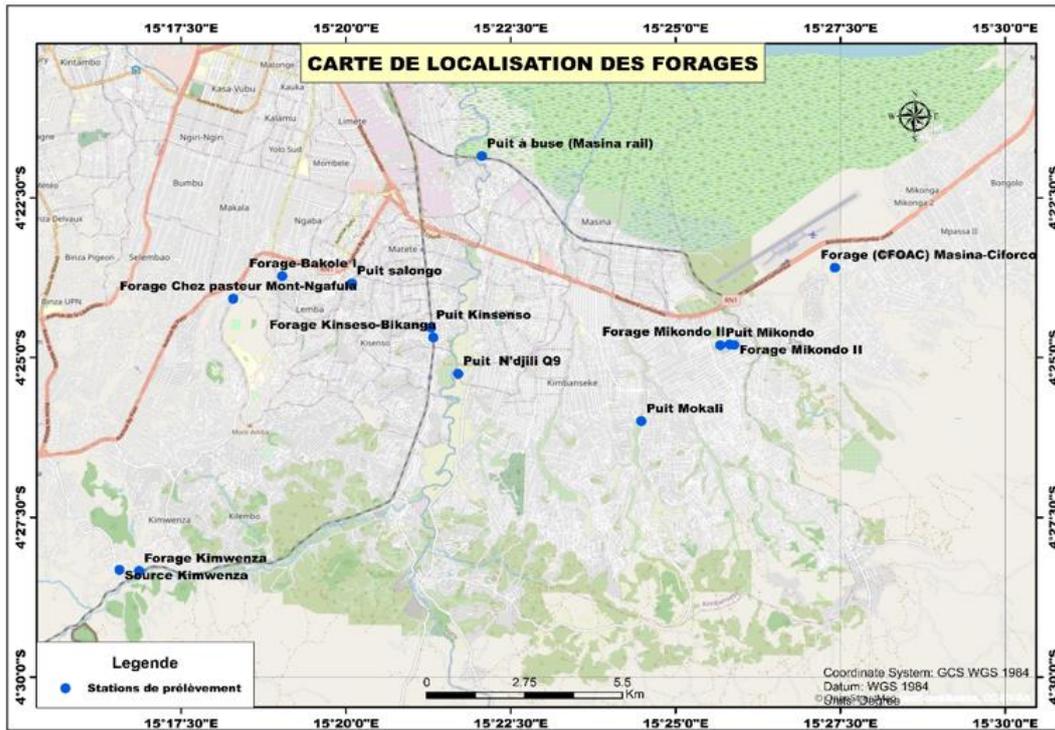


Figure 3 : Carte de prélèvement des échantillons des eaux souterraines

Tableau 1 : Les stations de prélèvement des échantillons

Station	Type	Code Type	Longitude	Latitude	Altitude
PN01	Source Kimwenza	Source	15,27608	-4,47206	320
PN02	Forage Chez pasteur Mont-Ngafula	Forage	15,304833	-4,40131	362
PN03	Forage Mikondo III	Forage	15,43151	-4,41337	317
PN04	Puit à buse (Masina rail)	Puit	15,36769	-4,36409	269
PN05	Puit Kinsenso	Puit	15,354841	-4,40886	294
PN06	Forage Mikondo II	Forage	15,43036	-4,41323	317
PN07	Puit Mikondo	Puit	15,42796	-4,41345	319
PN08	Forage-Bakole I	Forage	15,317212	-4,39541	375
PN09	Forage (CFOAC) Masina-Ciforco	Forage	15,4189	-4,3932	316
PN10	Forage Kinseso-Bikanga	Forage	15,35542	-4,41142	295
PN11	Forage Kimwenza	Forage	15,281068	-4,47232	322
PN12	Puit salongo	Puit	15,33482	-4,39732	309
PN13	Puit Mokali	Puit	15,408	-4,43323	336
PN14	Puit N'djili Q9	Puit	15,36172	-4,42089	294

* PN = Puit Numéro

Pour l'échantillonnage, 1,5 litres d'eau par échantillons ont été pris et stockés dans des bouteilles en polyéthylène des capacités de 500 mL et 1 L préalablement lavées à l'acide nitrique puis à l'eau distillée pour l'analyse au laboratoire des paramètres physico-chimiques. Les échantillons d'eaux destinés à l'analyse des éléments traces métalliques ont été prélevés à l'aide d'une pissette et stockés dans des bouteilles en polyéthylène des capacités de 100 mL. Ces échantillons ont été pris après filtrage et acidification dans l'optique de stabiliser les solutions à pH < 2 [14]. Ces échantillons ont été conservés dans une glacière gardant la température à 4°C pendant le transport au laboratoire CHANALTOXEN (Chimie analytique et toxicologie environnementale) de la faculté des sciences à l'université de Kinshasa pour les différentes analyses. Les analyses physico-chimiques ont été effectuées dans les premières 24 heures au laboratoire et cela pour ne pas altérer l'échantillon. La **Figure 4** ci-dessous montre les matériels utilisés pour l'échantillonnage et la conservation des eaux souterraines.



Figure 4 : Matériels utilisés pour l'échantillonnage des eaux souterraines

Les eaux prélevées ont fait l'objet de plusieurs analyses dont les analyses physico-chimiques et l'analyse des éléments traces métalliques. Les paramètres physico-chimiques tels que : Température ($^{\circ}\text{C}$), pH, Conductivité (CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)), TDS (solides totaux dissous), Salinité ($\%\text{NaCl}$), Turbidité (NTU), Acidité Totale, Acidité Forte, Alcalinité Simple $^{\circ}\text{F}$ (TA), Alcalinité Complète $^{\circ}\text{F}$ (TAC), Dureté Totale (THt), Calcium (Ca^{2+}), Magnésium (Mg^{2+}), Chlorure (Cl^{-}), Bicarbonate (HCO_3^{-}), Sulfate (SO_4^{2-}), Nitrate (NO_3^{-}), Potassium (K^{+}), Sodium (Na^{+}). Les éléments traces métalliques analysés sont : Plomb (Pb), Arsenic (As), Cadmium (Cd).

2-3-2. Méthode d'analyse et de traitement des données

Les échantillons prélevés ont été conditionnés et transportés au laboratoire d'analyse (**Figure 5**). Les paramètres mesurés in-situ sont : Température ($^{\circ}\text{C}$), pH, Conductivité (CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)), TDS (solides totaux dissous), Salinité ($\%\text{NaCl}$), Turbidité (NTU). Ces paramètres sont mesurés sur le terrain à l'aide des appareils et méthodes spécifiques (**Tableau 2 et Figure 5**). Ces paramètres ont été mesurés à l'aide d'un multi paramètre HANNA programmé et étalonné (**Figure 6**).



Figure 5 : a) Spectromètre d'absorption atomique ; b) Filtrage d'échantillons à l'aide d'un papier filtre ; c) Préparation des solutions standard avant analyse par la méthode de spectrométrie ; d) Analyse des échantillons d'eaux souterraines par la méthode volumétrique et titrimétriques

Tableau 2 : Paramètres et méthodes d'analyse utilisées in-situ

Paramètres	Symbole et Unité	Méthode d'analyse
Température	T (°C)	Thermomètre électronique
Potentiel hydrogène	pH (sans unité)	pH-mètre
Conductivité	CE (µS/cm)	Conductimètre
Solides totaux dissous	TDS	TDS-mètre
Salinité	%NaCl	Conductimètre
Turbidité	NTU	Turbidimètre HACH



Figure 6 : Multi paramètre HANNA utilisé pour mesurer les paramètres physico-chimiques in-situ

Le **Tableau 3** présente les méthodes utilisées pour analyser quelques paramètres au laboratoire. Ces paramètres sont : l'acidité Totale, Acidité Forte, Alcalinité Simple °F (TA), Alcalinité Complète °F (TAC), Dureté Totale (Tht), les cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+), les anions majeurs (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^-), les éléments traces métalliques (Pb, Cd, As).

Tableau 3 : Paramètres et méthodes utilisés au laboratoire

Paramètres	Méthodes
TA °F	Titrimétrie [(NaOH 0,02N/Phénolphtaléine)]
TAC °F	Titrimétrie [(NaOH 0,02N/Méthylorange)]
Dureté	Méthode Volumétrique par complexométrie avec une solution d'EDTA
HCO3	Dérivé de TAC °F
Calcium	Méthode Volumétrique par complexométrie avec une solution d'EDTA
Magnésium	Méthode Volumétrique par complexométrie avec une solution d'EDTA
Chlorure	Méthode de MOHR AgNO3
Sodium	Dérivé de NFT 90 – 020 (avec standard)
Potassium	Dérivé de NFT 90 – 020 (avec standard)
Nitrates	Méthode par spectrométrie UV-visible
Sulfates	Méthode par spectrométrie UV-visible
Plomb	Méthode par spectrométrie d'absorption atomique
Arsenic	Méthode par spectrométrie d'absorption atomique
Cadmium	Méthode par spectrométrie d'absorption atomique

Les résultats des analyses chimiques ont été traités par des méthodes hydrochimiques et statistiques. La méthode hydrochimique est basée sur l'utilisation de diagramme de piper pour la classification hydrochimique des eaux. Cette méthode est fiable et fréquemment utilisée avec de bons résultats [15 - 20]. La méthode statistique est basée sur l'analyse en composante principale (ACP). Cette méthode est plus utilisée pour comprendre l'origine de la minéralisation des eaux [14, 18, 19, 21 - 24]. Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel XLSTAT 2018 et ces résultats ont été également comparés aux valeurs guides de l'Organisation Mondiale de la Santé [25].

3. Résultats

Les différentes valeurs des paramètres physico-chimiques obtenues à l'issue des analyses faites in-situ et les analyses au laboratoire ont fait l'objet de plusieurs interprétations. L'analyse de ces résultats était importante car elle nous a permis de savoir le type de contamination et la qualité des eaux souterraines dans le bassin versant de la rivière N'djili.

3-1. Résultats de l'étude physico-chimique

3-1-1. Paramètres physiques des eaux souterraines du bassin de la N'djili (Mesures in situ)

Les paramètres physiques des eaux du bassin de la N'djili sont consignés dans le **Tableau 4**. A l'analyse de celui-ci, il ressort que les eaux du bassin de la N'djili ont été acides à neutre, avec un pH qui a varié de 3,8 à 7,7, pour une moyenne de 5,9. Les valeurs les plus fréquentes se situaient en dessous de l'intervalle de la norme de potabilité de l'OMS soit 57,14 % des points de prélèvement d'échantillons d'eaux souterraines. Les eaux souterraines de ces ouvrages ont été acides. Cette acidité est liée à la dissociation de l'acide carbonique issu du CO₂ atmosphérique solubilisé dans l'eau, et à celle des acides humiques et fulviques libérés lors de la dégradation de la matière organique du sol [26]. Cependant, 42,86 % des points de prélèvement d'échantillons d'eaux souterraines ont des valeurs situées dans l'intervalle de la norme de potabilité de l'OMS. Les valeurs de température enregistrées dans les eaux souterraines ont varié de 25,8°C à 32,85°C avec une valeur moyenne de 28,3°C. La quasi-totalité des points de prélèvement des eaux souterraines ont présenté des valeurs de température inférieures à la norme de potabilité de l'OMS à l'exception d'un seul ouvrage dont la valeur était légèrement au-dessus de la valeur guide fixée par l'OMS. La conductivité électrique mesurée variait de 68 à 1143 µS/cm pour une moyenne de 407,5 µS/cm. Bien qu'aucune valeur n'ait dépassé la valeur limite fixée par l'OMS, les eaux souterraines du bassin de la N'djili ont été moyennes à fortement minéralisées. Les valeurs de TDS mesurées étaient comprises entre 34 mg/L et 570 mg/L pour une moyenne de 202,7 mg/L. Toutes ces valeurs mesurées sont inférieures à la norme de l'OMS. Les eaux souterraines du bassin versant de la N'djili ont présenté des valeurs de turbidité qui ont varié entre 0,69 NTU à 8,69 NTU, pour une valeur moyenne de 3,5 NTU. La majorité des points de prélèvement d'eaux souterraines ont montré des concentrations supérieures à la norme de potabilité fixée par l'OMS à l'exception d'un seul ouvrage dont la concentration est inférieure à la norme. Les valeurs de salinité des eaux souterraines du bassin de la N'djili ont oscillé entre 0,1%NaCl et 2,94%NaCl pour une valeur moyenne de 0,8%NaCl. Il n'y a pas des valeurs guides fixées par l'OMS pour le paramètre salinité. La dureté totale des eaux souterraines du bassin de la N'djili a varié entre 2,4°F et 22°F avec une valeur moyenne de 12,4°F. Les valeurs de dureté les plus fréquentes ont oscillé entre 15°F à 22°F soit 42,85 % des points de prélèvements d'échantillons d'eaux souterraines. Cet intervalle des valeurs représente des eaux moyennement douces [26]. Cependant, 35,71 % des points d'échantillonnages d'eaux souterraines ont présenté des valeurs comprises entre 7°F à 15°F. Cette fourchette des valeurs représente des eaux douces. En fin, 21,44 % des stations

d'échantillonnages ont montré des valeurs comprises entre 2,4°F à 7°F. Il s'agit des eaux très douces [26]. 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 [25].

3-1-2. Paramètres chimiques des eaux souterraines du bassin de la N'djili

Les paramètres chimiques des eaux souterraines du bassin de la N'djili sont consignés dans le **Tableau 4**. Les cations étudiés dans les eaux du bassin versant de la N'djili étaient constitués des ions Na^+ , K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} . Les valeurs des concentrations de Na^+ mesurées dans les eaux du bassin de la N'djili ont varié de 0,01 mg/L à 131,63 mg/L avec une valeur moyenne de 58,9 mg/L. Tous les points de prélèvement des eaux souterraines ont présenté des concentrations inférieures aux valeurs guides fixées par l'OMS. Les concentrations en potassium (K^+) dans les différents points de prélèvement ont oscillé entre 0,01 mg/L à 74,6 mg/L avec une valeur moyenne de 33,4 mg/L. Il n'y a pas des valeurs guides fixées par l'OMS pour le potassium. Le calcium (Ca^{2+}) a montré des valeurs des concentrations comprises entre 4,20 mg/L à 75,2 mg/L pour une valeur moyenne 31,2 mg/L alors que les valeurs de magnésium (Mg^{2+}) mesurées dans ces eaux ont varié de 0,12 mg/L à 25,02 mg/L avec une moyenne de 11,3 mg/L. Bien qu'il n'y ait pas des valeurs guides fixées par l'OMS, le calcium et le magnésium contribuent en grande partie dans la dureté de l'eau. Les anions étudiés dans les eaux souterraines du bassin versant de la N'djili étaient constitués des ions chlorure (Cl^-), sulfate (SO_4^{2-}) et bicarbonate (HCO_3^-) et nitrate (NO_3^-). Les valeurs des ions chlorures dosées dans les eaux souterraines du bassin versant de la rivière N'djili s'inscrivaient dans l'intervalle de 35,5 mg/L à 124,25 mg/L pour une valeur moyenne de 71 mg/L. Tous les points de prélèvement des eaux souterraines ont présenté des concentrations inférieures aux valeurs guides fixées par l'OMS. Le dosage des ions sulfate dans ces eaux ont donné des valeurs comprises entre 8,34 mg/L à 97,16 mg/L pour une moyenne 34,74 mg/L.

Bien qu'aucune valeur n'ait dépassé la norme fixée par l'OMS, les eaux souterraines ont des concentrations non négligeables en sulfate. Les valeurs des teneurs en bicarbonate dans ces eaux s'inscrivaient dans l'intervalle de 0 à 97,6 mg/L pour une moyenne de 27,8 mg/L. L'OMS n'a pas fixée des valeurs limites en ce qui concerne la concentration en bicarbonate dans les eaux de consommation. Les concentrations en nitrates (NO_3^-) dans ces eaux ont varié de 3,05 mg/L à 397,73 mg/L avec une moyenne de 168,5 mg/L. Un seul point d'eau (PN12) a présenté une concentration inférieure aux valeurs guides fixées par l'OMS. De manière générales, ces points de prélèvement ont présenté des valeurs des concentrations en nitrate élevées au-dessus des valeurs guides telles que définies par l'OMS. Les éléments traces métalliques analysés dans les eaux souterraines du bassin versant de la N'djili ont été : le plomb (Pb), le cadmium (Cd), l'Arsenic (As). D'après les résultats rapportés dans le **Tableau 4**, la concentration en plomb était comprise 0,060 mg/L et 0,082 mg/L pour une moyenne de 0,1 mg/L. Ces valeurs sont largement supérieures à la norme de l'OMS. Les valeurs de concentration en cadmium de ces eaux ont varié entre 0,004 mg/L à 0,090 mg/L pour une moyenne de 0,016 mg/L. La majorité des points d'échantillonnage ont présenté des concentrations au-dessus de la norme fixée par l'OMS. Quant aux concentrations de l'arsenic analysées dans ces eaux, elles'inscrivaient dans l'intervalle de 0,042 mg/L à 0,649 mg/L pour une moyenne de 0,371 mg/L. Tous les points d'échantillonnages ont montré des valeurs supérieures à la norme fixée par l'OMS.

Tableau 4 : Récapitulatif des mesures des paramètres physiques et chimiques des eaux du bassin de la N'djili

Paramètres	Min	Max	Moyenne	Médiane	Ecart type	Norme OMS
pH	3,8	7,7	5,9	6,02	1,09	6,5 – 8,5
T°C	25,8	32,85	28,3	27,99	1,15	30 °C
CE (µS/cm)	68	1143	407,5	317	260,63	1 200
TDS	34	570	202,7	154,5	126,14	600
Turbidité (NTU)	0,69	8,69	3,5	1,60	2,68	1
Salinité (%NaCl)	0,1	2,94	0,8	0,55	0,54	PVG
(THt)°F	2,4	22	12,4	12,9	5,24	PVG
TAC (méq/L)	0,2	1,20	0,50	0,50	0,18	PVG
Ca (mg/L)	4,8	75,2	31,2	33,36	11,20	PVG
Mg (mg/L)	0,12	25,02	11,3	10,08	7,41	PVG
Na (mg/L)	0,01	131,63	58,9	61,23	32,06	200 mg/L
K (mg/L)	0,01	74,57	33,4	34,69	18,16	PVG
HCO ₃ (mg/L)	0,00	97,60	27,8	18,91	21,58	PVG
Cl (mg/L)	35,50	124,25	71	71	20,28	250 mg/L
SO ₄ (mg/L)	8,37	97,16	34,7	25,22	23,63	250 mg/L
NO ₃ (mg/L)	3,05	397,73	168,5	154,05	91,56	50 mg/L
Pb (mg/L)	0,060	0,082	0,1	0,061	0,007	0,001 mg/L
Cd (mg/L)	0,004	0,090	0,016	0,008	0,014	0,003 mg/L
As (mg/L)	0,042	0,649	0,371	0,387	0,105	0,001 mg/L

*PVG : Pas des valeurs guide

3-1-3. Chimie des eaux de la nappe et faciès hydrochimique

L'interprétation des faciès hydrochimiques est un outil utile pour la détermination du mode d'écoulement et l'origine des histoires chimiques des eaux. Le faciès chimique des eaux souterraines du bassin versant de la rivière N'djili a été déterminé classiquement à l'aide du diagramme de piper, en utilisant le logiciel Diagramme du laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon [27]. Ce diagramme est très utilisé en hydrochimie pour la catégorisation de faciès chimique d'une eau et dans l'étude d'évolution spatio-temporelle du chimisme d'une eau ou d'un aquifère [28]. La représentation des concentrations en éléments majeurs sur le diagramme de piper (**Figure 7**) a montré que les eaux souterraines du bassin versant de la rivière N'djili présentaient deux faciès chimiques :

- ⇒ Le faciès chlorurée sodique et potassique qui représentait 78,57 % des eaux souterraines. Ces faciès sont représentés par les stations ci-après : PN01, PN02, PN03, PN05, PN06, PN07, PN08, PN10, PN11, PN15, PN14.
- ⇒ Le faciès chlorurée calcique et magnésium représentait 21,43 % des eaux souterraines. Ces faciès sont représentés par les stations ci-après : PN09, PN12, PN13.

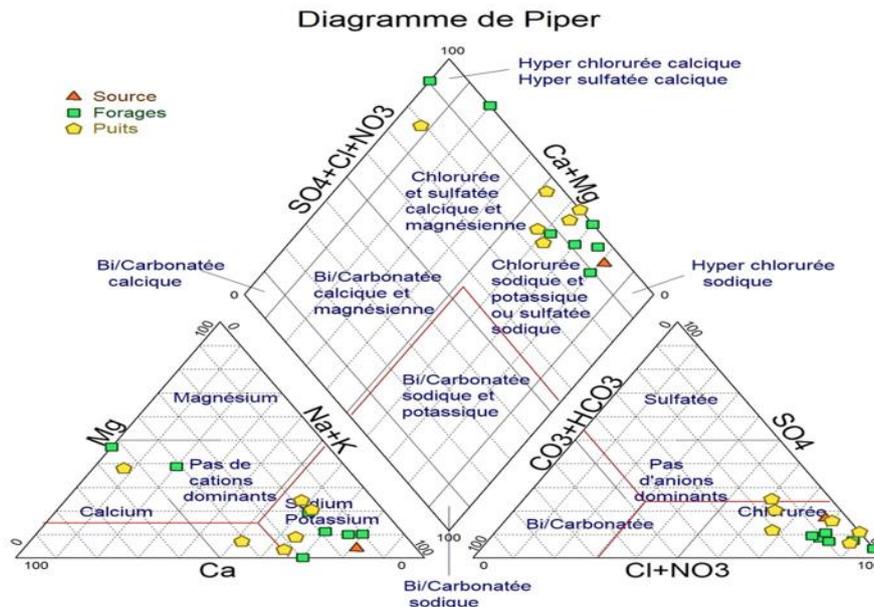


Figure 7 : Diagramme de Piper des eaux souterraines du bassin de la rivière

3-1-4. Étude statistique multivariée

3-1-4-1. Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode statistique multivariée (multidimensionnelle) permettant de résumer les informations dans le but de comparer les systèmes entre eux [29]. L'analyse statistique des données physico-chimiques de 16 variables et 14 individus (points d'échantillonnages) a été réalisée par l'analyse en composante principale (ACP). L'analyse en composante principale a montré les tendances générales des différentes variables sur le trois premiers axes factoriels F1-F2-F3, L'axe F1 a une variance exprimée de 38,765 %, l'axe F2 avec 17,854 %, l'axe F3 avec 13,94 %. Le cumul de la variance totale exprimée a été de 70,56 % pour les trois axes tel que présenté dans le **Tableau 5** ci-dessous.

Tableau 5 : Corrélations entre les axes et les variables

	F1	F2	F3
pH	0,560	0,481	-0,156
CE	0,869	-0,446	-0,159
TDS	0,883	-0,423	-0,152
Sal.	0,850	-0,438	-0,215
Turb. NTU	0,326	0,505	0,680
TA	0,207	-0,272	0,554
Na	0,743	-0,026	0,497
Ca	0,653	-0,400	-0,234
Mg	0,370	0,528	-0,316
HCO ₃	0,656	0,575	-0,203
Cl	0,326	-0,124	0,708
SO ₄	0,812	0,395	-0,048
NO ₃	0,803	-0,241	0,188
Pb	-0,536	-0,073	-0,118
Cd	0,256	0,781	0,231
As	0,415	0,335	-0,542
Valeurs	6,202	2,857	2,23
% Variance	38,765	17,854	13,94
% Cumulé	38,765	56,619	70,56

L'analyse du **Tableau 5** ci-dessus a montré que le facteur 1 (F1) était corrélé positivement au CE, TDS, Sal, Na^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} et NO_3^- ; le facteur 2 (F2) était corrélé positivement au Cd alors que le facteur 3 (F3) était corrélé positivement au Cl^- et à la Turb.NTU. La corrélation est établie entre toutes les variables prises deux à deux. La corrélation est très bonne lorsqu'elle est proche de 1 [29]. Les coefficients de corrélation entre ces variables sont donnés par la matrice de corrélation (**Tableau 6**). A l'analyse du **Tableau 6**, nous constatons une très bonne corrélation entre la conductivité électrique et le calcium (0,769). Cette corrélation très significative témoigne d'une minéralisation qui proviendrait de l'altération des roches et de l'hydrolyse acide des minéraux silicatés. Notons aussi la corrélation positive entre la conductivité électrique et les nitrates (0,750). La présence des nitrates peut être attribuée à la dégradation de la matière organique par l'activité biologique dans les couches superficielles des sols, avec production de CO_2 , pour être ensuite entraînés en profondeur par les eaux d'infiltration avec le phénomène de pluvio-léssivage des sols [14]. En effet, toutes les stations de prélèvement des eaux souterraines dans le bassin versant se trouvent à proximité des plantations agricoles. Les concentrations élevées des nitrates dans les eaux peuvent également s'expliquer par le fait que ces points de prélèvement se trouvent proche des fosses septiques, des points des rejets des matières fécales, des points de rejets des fumiers d'animaux et les effluents industriels. Le HCO_3^- présente une forte corrélation avec le SO_4 (0,811). Nous notons également une corrélation positive entre le SO_4 et le Na (0,621) mais aussi entre NO_3 et le Na (0,848). La représentation sur les deux premiers plans factoriels F1-F2 (**Figure 8**) illustre un regroupement de CE, TDS, Ca, HCO_3^- , SO_4 , NO_3^- , Na, Mg. Ces éléments semblent avoir une double origine, La minéralisation issue de l'interaction eau-roche, avec la présence de l'association Ca-Mg-Na- HCO_3^- qui sont des bons indicateurs de l'altération des minéraux de feldspath, des minéraux ferromagnésiens et des minéraux argileux. La deuxième source de minéralisation proviendrait des activités anthropiques représenté par l'association SO_4 et NO_3^- . La représentation de deux premiers plans factoriels F1-F3 (**Figure 9**) illustre un regroupement de Turb. NTU, Cd cela témoigne d'une minéralisation d'origine anthropique.

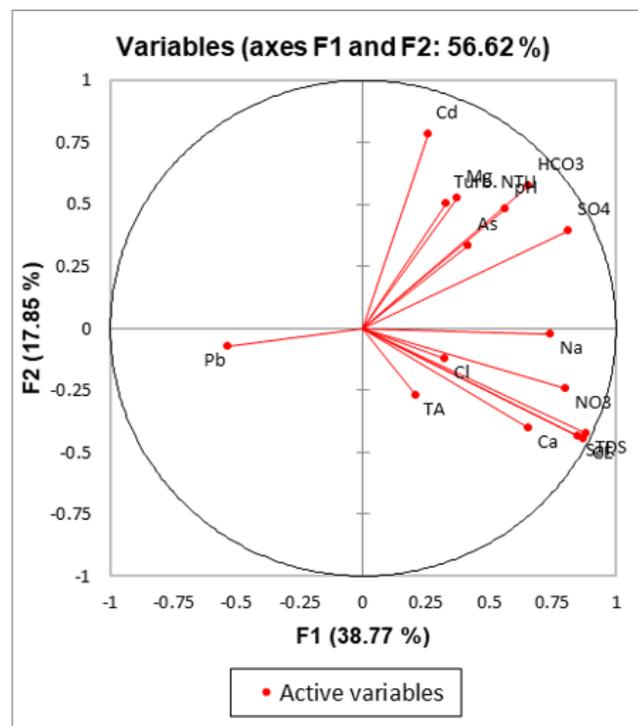


Figure 8 : ACP des eaux souterraines du bassin versant de la rivière N'djili : espace des variables F1 - F2

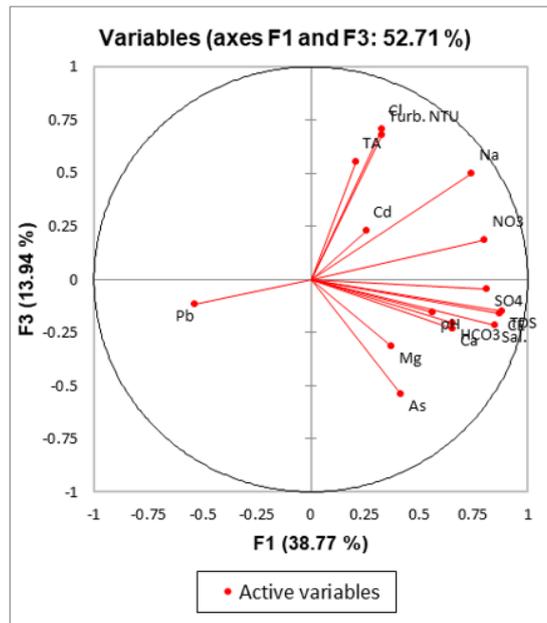


Figure 9 : ACP des eaux souterraines du bassin versant de la rivière N'djili : espace des variables F1 - F3

Tableau 6 : Matrice des coefficients des corrélations entre les paramètres physico-chimiques des eaux du bassin versant de la rivière N'djili

Variables	pH	CE	TDS	Sal.	Turb. NTU	TA	Na	Ca	Mg	HCO3	Cl	SO4	NO3	Pb	Cd	As
pH	1															
CE	0,339	1														
TDS	0,341	0,998	1													
Sal.	0,349	0,968	0,969	1												
Turb. NTU	0,472	0,030	-	-0,045	1											
TA	-0,352	0,191	0,179	0,147	0,185	1										
Na	0,303	0,570	0,597	0,511	0,467	0,291	1									
Ca	0,231	0,769	0,764	0,820	-	0,138	0,167	1								
Mg	0,331	0,144	0,156	0,087	0,200	-0,156	0,013	0,271	1							
HCO3	0,575	0,361	0,375	0,300	0,262	0,100	0,375	0,137	0,665	1						
Cl	0,095	0,251	0,228	0,142	0,635	0,539	0,437	0,272	0,073	0,045	1					
SO4	0,555	0,530	0,567	0,538	0,352	0,063	0,621	0,346	0,509	0,811	0,049	1				
NO3	0,243	0,750	0,779	0,732	0,224	0,113	0,860	0,507	0,149	0,245	0,280	0,570	1			
Pb	-0,233	-	-	-0,390	-	-0,322	-	-	0,169	-	-0,066	-	-	1		
Cd	0,390	0,390	0,390	0,172	0,607	-0,069	0,279	0,516	0,062	0,406	0,379	0,357	-	-	1	
As	0,398	0,269	0,152	0,300	-	-0,049	-	0,088	0,354	0,448	-0,034	0,566	0,154	-	0,258	1
					0,068		0,043	0,243	0,456	0,644	-0,163	0,329	0,021	-	0,509	

4. Discussion

Le pH moyen des eaux souterraines du bassin de la N'djili est de 5,9. Cette valeur de pH est caractéristique des aquifères gréseux et des sables purement siliceux [26]. L'intervalle de valeurs de pH recommandé par l'OMS est 6,5–8,5 [25]. Le pH moyen des eaux analysées est en-dessous de la limite inférieure de 6,5. Ceci montre le caractère acide de ces eaux souterraines dans l'ensemble. L'acidité des eaux souterraines peut avoir une double origine [29]. Elle peut être due à un processus biogéochimique ou anthropogénique [29].

Cette acidité forte peut aussi être due à la présence d'acides minéraux ou organiques dans les eaux naturelles [26]. La majorité des ouvrages de captage d'eaux souterraines ont présenté des valeurs de température inférieures à la norme de potabilité de l'OMS hormis un seul point d'eau dont la valeur était supérieure à la valeur guide fixée par l'OMS. Ce paramètre influence les réactions biologiques qui se produisent dans l'eau [30, 31]. Les faibles températures de ces eaux ne favoriseraient pas le développement des micro-organismes car à température élevée, le développement des micro-organismes est favorisé et les problèmes de goût, de couleur et d'odeur peuvent se poser [25]. Les valeurs de la conductivité électrique et des solides totaux dissous mesurées ont montré que les eaux souterraines du bassin sous étude ont été moyennes à fortement minéralisées. Plus la minéralisation de l'eau de certains ouvrages des captages d'eaux est élevée plus le goût de cette eau est salée lors de sa consommation [29]. Ce goût salé de l'eau peut être l'une des causes d'abandon des forages ou des puits par les populations [29]. Les teneurs en calcium et en magnésium dans les eaux souterraines du bassin versant de la N'djili étaient inférieures aux valeurs recommandées par l'OMS. La présence de ces ions dans l'eau provoque la dureté. Au-delà de la valeur fixée par l'OMS, le calcium provoque aussi un problème de goût à l'eau [25]. A faible concentration, le magnésium peut causer des problèmes cardiaques et des troubles neuromusculaires [32]. Le dosage des ions sulfates et chlorures dans les eaux souterraines du bassin versant sous études a donné des concentrations en dessous des normes des potabilités telles que fixées par l'OMS. A des concentrations supérieures aux valeurs guides définies par l'OMS, ces ions peuvent dégrader la qualité des eaux de consommation. Les ions chlorures peuvent avoir deux origines [29]. Une origine naturelle dans le cas de l'infiltration d'eaux marines [29]. Cependant le contexte géologique de la zone d'étude nous ne nous permet d'accepter cette hypothèse. Les ions chlorures peuvent être d'origine anthropiques. Ils peuvent être liés aux rejets humains et à la décomposition de la matière organique végétale associé au phénomène de pluviollessivage [33].

Les concentrations considérables de ces ions dans les eaux souterraines échantillonnées étaient liées aux activités anthropiques constatées dans le bassin versant. Quant aux ions sulfates dans les eaux prélevées, ils sont d'origines anthropiques. En effet, une grande partie des points d'échantillonnage se trouve à proximité des zones agricoles et des activités industrielles. L'utilisation excessive des engrais chimiques, des produits phytosanitaires a beaucoup influé sur la concentration totale de ces ions dans l'eau. La quasi-totalité des eaux souterraines prélevées et analysées dans le bassin de la N'djili ont présenté des concentrations en nitrates au-dessus de la norme OMS (50 mg/L). Tous ces ouvrages de captage d'eaux souterraines ne doivent pas être utilisées pour la boisson afin d'éviter des cas probables des maladies. La consommation d'une eau riche en nitrates peut provoquer des maladies telles que la méthémoglobine, le cancer gastrique et de la prostate [34]. Elle peut aussi entraînée un risque génotoxique et de lymphomes non Hodgkiniens élevé [34]. Les concentrations élevées en nitrates dans les eaux peuvent indiquer aussi la présence des bactéries très dangereuses et d'autres polluants [35]. Le nitrate peut provenir également de l'agriculture (utilisation des engrais), des eaux usées domestiques et des fumures animales [36]. Une autre source probable serait aussi la décomposition de la matière organique végétale [33]. Les concentrations en élément traces métalliques tels que le plomb, le cadmium et l'arsenic ont présenté des valeurs largement au-dessus des normes des potabilités telles que définies par l'OMS. Tous ces points d'eaux ne doivent pas être utilisées pour la boisson afin d'éviter des cas des maladies. En effet, l'ingestion d'une eau riche en plomb peut provoquer des problèmes neurologiques et entraîne d'importants retards de développement psychomoteur chez les jeunes [25]. Les populations qui consomment de l'eau riche en cadmium courent le risque de souffrir de fragilité osseuse, des effets sur l'appareil respiratoire, des troubles de la reproduction ainsi qu'un risque accru de cancer [25]. La consommation d'une eau riche en arsenic peut causer des vomissements, des douleurs abdominales, la diarrhée, l'engourdissement et des fourmillements dans les extrémités, des crampes musculaires et dans les cas extrêmes le décès [25]. L'analyse en composante principale a permis de mettre

en évidence deux principaux mécanismes hydrogéochimiques responsables de l'évolution de la minéralisation des eaux souterraines du bassin de la rivière N'djili. Il s'agit dans un premier temps d'un processus naturel d'interaction eau-roche avec la présence de l'association Ca-Mg-Na-HCO₃. Ce processus majeur qui gouverne le chimisme des eaux souterraines dans le bassin de la rivière N'djili est liée à l'altération du réservoir dans le temps mais aussi à la précipitation des ions issus de la dissolution des silicates. Le CO₂ provenant de la décomposition de la matière organique et qui s'infiltré dans les nappes à la faveur des précipitations est le composé catalyseur de ce mécanisme [29]. Ce CO₂ facilite la réaction d'hydrolyse des minéraux silicatés et permet la libération des ions HCO₃⁻ ainsi que certains cations tels que le Ca, Mg et le Na [29]. Le deuxième mécanisme hydrogéochimique à la base de la minéralisation des eaux souterraines du bassin de la N'djili est lié aux activités anthropiques (agro-industriels) représenté par l'association SO₄ et NO₃. Ce mécanisme est gouverné par l'infiltration directe de ces éléments dans l'aquifère provoquant une contamination sulfatée et azotée des eaux souterraines du bassin de la N'djili. Les sources principales de ces ions sont : les activités anthropiques telle que l'utilisation des engrais chimiques, les dépôts d'ordures ménagères et les effluents domestiques [31, 34, 36].

5. Conclusion

L'étude hydrochimique des eaux souterraines du bassin versant de la rivière N'djili a permis de caractériser cette ressource naturelle. Les analyses physico-chimiques ont montré que ces eaux étaient acides à neutre et très minéralisées dans l'ensemble. Les eaux souterraines du bassin versant de la rivière N'djili se regroupaient autour de deux principales familles d'eaux dont les eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes qui étaient les plus rencontrées. Cette caractérisation hydrochimique a permis en outre d'expliquer les processus responsables de la minéralisation de ces eaux qui sont : l'échange des éléments chimiques entre ces eaux et les différentes formations géologiques encaissantes : la dissolution/précipitation des minéraux et l'infiltration des substances liées aux activités anthropiques (rejets des effluents domestiques et agro-industriel). Les résultats obtenus à partir de la corrélation inter-éléments chimique ont confirmé que les paramètres influant sur la minéralisation de ces eaux étaient liés principalement avec la conductivité électrique et aux espèces ioniques en solution (Ca²⁺, NO₃) qui ont une origine géologique et anthropiques.

Références

- [1] - J. D. K.M. LUBOYA, "Etude systémique du bassin versant de la rivière N'djili à Kinshasa", Mémoire de diplôme d'études supérieures, Ecole Régionale Post-Universitaire d'Aménagement et de gestion Intégrés des Forêts et Territoires Tropicaux (ERAIFT), Kinshasa, (2002) 219 p.
- [2] - J. NITU, "Pollution de la rivière N'djili et contraintes des sols autour du pool malebo (cas du site agricole masina rail 1/kinshasa)", Master de spécialisation en sciences et gestion de l'environnement dans les pays en développement, uliege, Liège, (2018) 47 p.
- [3] - J. BOLAND, I. KOOMEN, J. VAN LIDTH DE JEUDE and J. OUDEJANS, "Les pesticides : composition, utilisation et risques", Agrodok 29, Fondation Agromisa, Wageningen, (2004) 11 p.
- [4] - N. MUZINGU, "Les sites maraîchers coopérativisés de Kinshasa en RD Congo : contraintes environnementales et stratégies des acteurs", Thèse de Doctorat, Université Catholique de Louvain, Louvain, (2010) 199 p.
- [5] - J. M. ILUNGA, N. DEVARAJAN, S. LE FAUCHEUR, J. K. MPUUTU, E. K. ATIBU, P. SIVALINGAM, K. PRABAKAR, P. T. MPIANA, W. WILDI and J. POTE, *Chemosphere*, 93 (6) (2013) 1070 - 1076
- [6] - I. C. NSIMANDA, E. D. MUSIBONO, L. N. BASOSILA and B. M. B. WANGA, *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 10 (1) (2015) 176 - 183 p.

- [7] - V. R. GIZANGA, E. A. D. MUSIBONO, A. L. ALEKE and E. F. MILAU, *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 21 (2) (2016) 360 - 366
- [8] - M. KABAMBA, N. BASOSILA, C. MULAJI, H. MATA and J. TUAKUILA, *Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 3 (2) (2016) 3 - 6
- [9] - W. KASUKU, C. BOULAND, CH. DE BROUWER, B. MARESCHAL, C. MULAJI, M. MALUMBA, O. MONAMA, B. EPUMBA and A. KITAMBALA, Etude de l'impact sanitaire et environnemental des déchets hospitaliers dans 4 établissements hospitaliers de Kinshasa en RDC, *Déchets, Sciences et Techniques*, 71 (2016) 25 - 33
- [10] - L. U. MINDELE, "Caractérisation et tests de traitement des déchets ménagers et boues de vidange par voie anaérobie et compostage pour la ville de Kinshasa", Thèse de Doctorat, Université de Liège, Liège, (2016) 313 p.
- [11] - M. N. BIPENDU, M. V. LUKANDA, E. A. D. MUSIBONO and K. V. PWEMA, *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 29 (2) (2017) 96 - 109
- [12] - K. M. KIFUANI, Wastewater Use and Urban Agriculture in Kinshasa, DR Congo, In: Agriculture in Urban Planning, (2009) 147 - 165 p., <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- [13] - A. EGOROFF, Esquisse géologique provisoire du sous-sol de Léopoldville d'après les données de sondage, Service géologique du Congo-Ruanda-Urundi, (1955)
- [14] - P. VUALU, "Approches de caractérisation géochimiques et géo-environnementale d'un projet minier dans le contexte de fond géochimique naturellement élevé et/ou anthropisé : application aux secteurs miniers Siscoe-Sullivan-Marban, Val-d'or, Canada", Thèse de doctorat inédite, université de Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), Québec, Canada, (2020) 370 p.
- [15] - K. E. AHOUSI, Y. B. KOFFI, A. M. KOUASSI, G. SORO, N. SORO, J. BIEMI, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6 (4) (2012) 1854 - 1873
- [16] - A. N. KOPA, J. D. H. LIKENG and A. NONO, *Int. J. Biol. Chem. Sci*, 6 (4) (2012) 1874 - 1894
- [17] - L. KOUZANA, A. BEN MAMMOU and N. GAALLOUL, *Intrusion marine et salinisation des eaux d'une nappe phréatique côtière (Korba, Cap-Bon, Tunisie)*, *Geo-Eco-Trop.*, 31 (2007) 57 - 70
- [18] - M. S. OGA, T. LASM, T. K. YAO, N. SORO, M. B. SALEY, D. KOUASSI and F. GNAMBA, *European Journal of Scientific Research*, 31 (1) (2009) 72 - 87
- [19] - K. E. AHOUSI, Y. B. KOFFI, A. M. KOUASSI, G. SORO, N. SORO and J. BIEMI, *European Journal of Scientific Research*, Vol. 89, N°3 (2012b) 359 - 383
- [20] - I. OUATTARA, B. KAMAGATÉ, A. DAO, D. NOUFÉ, I. SAVANÉ, Processus de minéralisation des eaux souterraines et transfert de flux en milieu de socle fissuré : cas du bassin versant transfrontalier de la Comoé (Côte d'Ivoire, Burkina Faso, Ghana, Mali), ISSN 2028-9324, Vol. 17, N°1 (2016) 57 - 69 p.
- [21] - V. CLOUTIER, R. LEFEBVRE, R. THERRIEN and M. M. SAVARD, *Journal of Hydrology*, 353 (2008) 294 - 313
- [22] - A. R. M. TOWFIQUL ISLAM, MUHAMMED ATIKUL HAQUE, K. W. MAW, M. D. SHUANGHE SHEN, MD. BODRUD-DOZA and AHOSAN HABIB, Assessing groundwater quality and its sustainability in Joypurhat district of Bangladesh using GIS and multivariate statistical approaches, DOI 10.1007/s10668-017-9971-3, (2017)
- [23] - A. RASHID, S. A. KHATTAK, L. ALI, M. ZAIB, M. AYUB, S. ULLAH, *Microchemical Journal*, 145 (2019) 1058 - 1065
- [24] - S. SELVAM, S. VENKATRAMANAN, P. SIVASUBRAMANIAN, Y. S. CHUNG and C. SINGARAJA, *Journal geological society of india*, Vol. 90, (2017) 62 - 68 p.
- [25] - OMS, Directives OMS pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères, Utilisation des excreta et des eaux ménagères en agriculture, Vol. IV, (2013) 32 p.
- [26] - J. RODIER J, B. LEGUDE, N. MERLET and COLL, "L'analyse de l'eau", Dunod, 9th Edition, (2009) 1579 p.
- [27] - R. SIMLER, "Diagrammes. Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon", Université d'Avignon, Logiciel d'hydrochimie multi-langage en distribution libre, (2007)

- [28] - R. SLIMANI, “Etude qualitative des ressources en eaux souterraines et cartographie de la vulnérabilité environnementale d’un aquifère au climat aride méditerranéen : cas de la cuvette de Ouargla, Algérie”, Thèse Doctorat, Univ. De Ouargla, Algérie, (2016) 149 p.
- [29] - G. SORO, T. D. SORO, N. M. R. FOSSOU, O. ADJIRI and N. SORO, *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 13 (3) (2019) 1870 - 1889, ISSN 1997-342X, <http://indexmedicus.afro.who.int>
- [30] - M. MAKHOUKH, M. SBAA, A. BERRAHOU and M. VAN CLOOSTER, “Contribution à l’étude physicochimique des eaux superficielles de l’oued Moulouya (Maroc Oriental)”, (2011) 21 p.
- [31] - A. AKIL A., T. HASSAN, E. H. FATIMA, B. LAHCEN and L. ABDERRAHIM, “Etude de la qualité physicochimique et contamination métallique des eaux de surface du bassin versant de Guigou”, Maroc, (2014) 11 p.
- [32] - F. WANELUS, “Caractérisation physico-chimique de l'eau destinée à la consommation humaine dans la Région Métropolitaine de Port-au-Prince”, Travail de Fin d’Etudes, Haïti, (2016) 64 p.
- [33] - L. MATINI, J. M. MOUTOU, MS. KONGO-MANTONO, *Afrique Science*, 05 (1) 2009 82 - 98, <https://www.ajol.info/index.php/afsci/article/view/61709>
- [34] - P. LEVALLOIS et D. PHANEUF, Les risques associés à la contamination de l'eau potable par les nitrates, Bulletin d'information en santé environnementale. Centre de santé publique de Québec., Vol. 3, N°3 (1992) 18 p.
- [35] - SA. ALAGBE, *Environ. Geol.*, 51 (2006) 39 - 45, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0302-5>
- [36] - J. YUAN, F. XU, G. DENG, Y TANG, P. LI, Hydrogeochemistry of shallow groundwater in a karst aquifer system of Bijie City, Guizhou province, *Water*, 9 (625) (2017) 1 - 16, DOI: <https://doi.org/10.3390/w9080625>