



Original Paper

<http://ajol.info/index.php/ijbcs>

<http://indexmedicus.afro.who.int>

Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du département de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire)

Abdoulaye TRAORE, Tanina Drissa SORO*, Brou DIBI et Larissa Josiane Anne YAO

Unité de Formation et de Recherche en Environnement, Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire.

**Auteur correspondant ; E-mail : standriss@gmail.com; Tél. : (225) 0708819697*

Received: 21-09-2021

Accepted: 22-01-2022

Published: 28-02-2022

RESUME

Cette étude avait pour but de comprendre le fonctionnement hydrogéochimique des eaux souterraines du département de Man situé à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Elle a fait appel aux méthodes de statistique descriptive, hydrochimique (diagramme de Piper) et à l'analyse en Composantes Principales (ACP) pour connaître la qualité, les faciès chimiques et les phénomènes de la minéralisation des eaux souterraines. L'échantillonnage a concerné 19 forages et les paramètres chimiques analysés sont Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , Cl^- , NO_2^- , Cu^{2+} , Fe^{2+} , PO_4^{3-} et Al^3 . Les résultats de la statistique descriptive ont montré que les eaux avaient une température moyenne de 27,34°C en saison sèche et 28,005°C en saison pluvieuse. Les eaux étaient acides pendant les deux saisons. Les valeurs de pH étaient comprises entre 5,58 et 7,74 avec une moyenne de 6,673±0,541 en saison sèche et entre 5,25 et 7,11 avec une moyenne de 6,223±0,441 en saison pluvieuse. Elles étaient peu minéralisées, avec des moyennes de conductivité électrique de 219,51 µS/cm en saison sèche et 206,50 µS/cm en saison pluvieuse. Ces eaux présentaient un faciès bicarbonaté calcique et magnésien majoritaire (Ca-Mg- HCO_3), un faciès chloruré calcique et magnésien (Ca-Mg-Cl) au cours des deux saisons et un faciès bicarbonaté sodique et potassique en saison pluvieuse (Na-K- HCO_3). Les principaux phénomènes à l'origine de la minéralisation des eaux étaient la minéralisation-temps de séjour, l'apport superficiel et la dégradation anthropique de la qualité des eaux et la pollution organique. Ces résultats constituent une base de données dans la gestion des eaux souterraines de la région.

© 2022 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : Hydrochimie, faciès, aquifère, minéralisation, Man.

Hydrogeochemical characterization of groundwater of Man department (Western of Côte d'Ivoire)

ABSTRACT

The aim of this study was to understand the hydrogeochemical functioning of groundwater in the Department of Man in western Côte d'Ivoire. It used descriptive, hydrochemical (Piper diagram) statistical methods, Principal Components Analysis (PCA) to know quality, chemical facies and groundwater mineralization process: Nineteen boreholes (19) were sampling and the chemical parameters analyzed were Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , Cl^- , NO_2^- , Cu^{2+} , Fe^{2+} , PO_4^{3-} and Al^3 . The results of the descriptive

statistic showed that groundwater had an average temperature of 27.34 degrees Celsius in the dry season and 28.005 degrees Celsius in the rainy season. Groundwater was acidic during both seasons. The pH values varied between 5.58 and 7.74 with an average of 6.673 ± 0.541 in dry season and between 5.25 and 7.11 with an average of 6.223 ± 0.441 in rainy season. It was low mineralized, with electrical conductivity averages ranging from 219.51 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in the dry season and 206.50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in the rainy season. The groundwater had a majority Ca-Mg-HCO₃, Ca-Mg-Cl facies during the two seasons and Na-K-HCO₃ facies in the rainy season. The main phenomena at the origin of the mineralization of the groundwater were mineralization-time of stay, the superficial contribution and anthropogenic degradation of water quality and organic pollution. These results were database for region groundwater management.

© 2022 International Formulae Group. All rights reserved.

Keywords: Hydrochemistry, facies, aquifer, mineralization, Man.

INTRODUCTION

Nécessaire à toute forme de vie, l'eau est un élément de promotion de la santé des individus et du développement socio-économique des collectivités humaines (Ouattara et al., 2016). L'utilisation de l'eau dans plusieurs secteurs d'activités humaines, l'augmentation de la population et les variations climatiques sont des facteurs qui affectent la ressource en eau, en terme de quantité et de qualité (Goné, 2001). Cependant, la répartition de ce patrimoine à travers le monde se fait de façon inégale. Près des trois quarts de la surface du globe sont couverts par l'eau (1370 millions de km²), l'eau douce ne représente que 2,5% et seulement 0,007% de celle-ci est accessible pour l'usage humain (Sarallier, 2003). Les eaux souterraines douces représentent 33 % des réserves, soit 15 millions de km³ (De Marsily et Besbes, 2017). L'eau souterraine est d'une importance capitale dans la plupart des régions du monde. Toutefois, cette ressource qui était jadis de bonne qualité, se trouve actuellement menacée par diverses sources de contamination ponctuelles et diffuses. Par ailleurs, selon les estimations de l'UNICEF/OMS (2019), un tiers de la population mondiale n'a pas accès à une source d'eau potable dont la moitié se trouve en Afrique. La question d'eau potable n'est guère reluisante en Côte d'Ivoire. En effet, le tarissement progressif des eaux de surface, conjugué à la croissance démographique et au développement des maladies hydriques inquiètent de plus en plus les gestionnaires de la ressource en eau qui doivent satisfaire la demande en quantité et en qualité.

On assiste alors depuis quelques années à un plus grand recours aux eaux souterraines (Goné, 2001 ; Mangoua et al., 2018). Malheureusement, sur le territoire national, qui est occupé essentiellement par les terrains cristallins et cristallophylliens (97,5% de la superficie totale), les réserves d'eau souterraine sont généralement de faibles quantités. Ces réserves sont localisées à travers les aquifères isolés de socle granitique fissuré, d'arènes sablo-argileuses et d'alluvions difficiles à gérer (Ehoussou et al., 2019). Ce problème d'eau est aggravé par la baisse presque régulière des précipitations durant ces dernières années, les irrégularités saisonnières, l'avancée galopante de la désertification et la dégradation progressive des facteurs environnementaux (Ahoussi et al., 2012). En Côte d'Ivoire, les eaux souterraines sont confrontées à un phénomène de pollution d'origine anthropique qui dégrade leur qualité. Les études réalisées sur les ressources en eau de la Côte d'Ivoire par Ahoussi et al. (2013), Eblin et al. (2014), Traoré et al. (2015), Ouattara et al. (2016), Adjiri et al. (2019) ont signalé de nombreux foyers de pollution aussi bien au niveau des eaux de surface que des eaux souterraines. Parfois le tarissement et les pannes mécaniques des forages qui captent cette eau souterraine obligent les populations à se tourner vers d'autres sources dont la qualité est méconnue. Le département de Man, situé à l'Ouest de la Côte d'Ivoire, ne fait pas exception à cette situation. De plus, l'utilisation courante des intrants agricoles (engrais, pesticides, etc.) et la présence des activités d'orpailleurs constituent une menace

pour la qualité des eaux souterraines. Pour une meilleure gestion de ces ressources, il est indispensable de connaître les processus hydrochimiques qui régissent leur minéralisation. C'est dans cette optique que s'inscrivait cette étude avec pour objectif général de caractériser du point de vue hydrogéochimique les eaux souterraines.

MATERIEL ET METHODES

Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude qui est le département de Man se situe à l'Ouest de la Côte d'Ivoire entre les longitudes 07°25' et 07°55'Ouest et les latitudes 07°00' et 07°40' Nord (Figure 1). Sa superficie est de 2593 km² et sa population est estimée à 334 166 habitants (INS, 2014).

La région Ouest bénéficie d'un climat tropical humide de type montagnard avec une seule saison de pluie et de fortes hauteurs pluviométriques annuelles qui varient de 1095 à 1900 mm (Goné, 2001). On y distingue une saison sèche d'une durée de 4 mois, allant de Novembre à Février et une saison de pluie allant de Mars à Octobre. Le relief de Man se subdivise en deux ensembles de morphologie et d'extension inégale : un ensemble montagneux (chaîne des Toura et des Dan) et une zone de plateaux (Kouamé, 2011). Les monts Dan et Toura présentent des sommets d'altitude voisine des 1000 m : monts Nyonyé (890 m), Guéton (944 m), Glo (949 m), Momi (1 302 m), Tonkpi (1 293 m) (Kouamé, 2011).

Elle appartient au domaine de la dorsale de Man appelée également dorsale de Léo. Les travaux de nombreux chercheurs parmi lesquels on peut citer Camil (1984), Kouamelan (1996) et Djro (1998) ont permis de connaître sa géologie. Elle comprend trois grandes unités lithologiques: une unité composée d'anorthosites, de norites, charnockites qui sont les plus dominantes, une unité de granitoïdes hétérogènes à biotite et des granitoïdes à deux micas et des migmatites sur granitoïdes hétérogènes à biotite (Figure 2). Les principaux cours d'eau sont le Kô et le N'zo. Au plan hydrogéologique, les différents aquifères de la région sont les aquifères d'altérites, les aquifères de fissures, les

aquifères d'alluvions et les aquifères de versants (Kouamé, 2011).

Méthodologie d'échantillonnage et d'analyse

Les points d'échantillonnage ont été choisis en fonction du niveau d'utilisation du point d'eau par les populations et en fonction de la densité des points d'eau de la zone d'étude.

L'échantillonnage a été réalisé sur 19 forages (Figure 2) répartis dans le département de Man. Dans le cadre de cette étude, deux campagnes d'échantillonnage ont été menées l'une en saison pluvieuse (Mars 2019) et l'autre en saison sèche (Décembre 2019). Une vidange du forage à échantillonner a été faite au préalable afin de s'assurer de la représentativité de l'échantillon. Les échantillons d'eau sont prélevés dans des flacons en polyéthylène propres d'un litre (1 L) rincés au préalable plusieurs fois avec l'eau à prélever. Ils sont remplis complètement d'eau à ras-bord et on y ajoute quelques gouttes d'acide chlorhydrique (HCl). Les échantillons sont fermés hermétiquement en évitant qu'ils ne contiennent des bulles d'air. Deux glacières ont été utilisées pour leur conservation avec des glaçons à 4°C. Ils sont par la suite acheminés au laboratoire pour analyse. La température (T°C), le pH, le potentiel redox (Eh), l'oxygène dissous (O₂dis), la turbidité (Turb) et la conductivité électrique (CE) ont été mesurés *in situ* avec le multi-paramètre HQ40d portable. Les paramètres chimiques analysés au laboratoire sont Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, NH₄⁺, SO₄²⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻, Cl⁻, NO₂⁻, Cu²⁺, Fe²⁺, PO₄³⁻ et Al³⁺. Les paramètres Cl⁻, Mg²⁺, Ca²⁺ et HCO₃⁻ ont été dosés à partir de la méthode de dosage. Les paramètres chimiques PO₄³⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻ et NH₄⁺ sont dosés par spectrophotométrie UV visible. Les éléments traces métalliques (Al³⁺, Cu²⁺, Fe²⁺) ainsi que K⁺ et Na⁺ ont été dosés par spectrométrie d'absorption atomique.

Méthodologie de traitement des données

Après avoir procédé à la validation des mesures par la balance ionique, les données collectées ont été traitées en utilisant les

méthodes de statistique descriptive, hydrochimique (diagramme de Piper) et d'Analyse en Composantes Principales (ACP). Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Statistica 7.1. Pour étudier la qualité des eaux, les valeurs des paramètres ont été comparées aux valeurs guides de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 2011) pour l'eau de boisson non influencée par les activités anthropiques. La méthode hydrochimique a nécessité l'utilisation du diagramme de Piper à partir du logiciel

Diagrammes 5.1. L'approche statistique multivariée utilisée pour connaître l'origine de la minéralisation des eaux est l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Selon Lasm et al. (2011), Akatumbila et al. (2016), Soro et al. (2019), l'ACP est une méthode statistique multidimensionnelle descriptive, utilisable comme outil d'aide à l'interprétation d'une matrice de données. Elle permet de mettre en évidence les ressemblances et la position graphique que présenteraient deux ou plusieurs variables chimiques au cours de leur évolution.

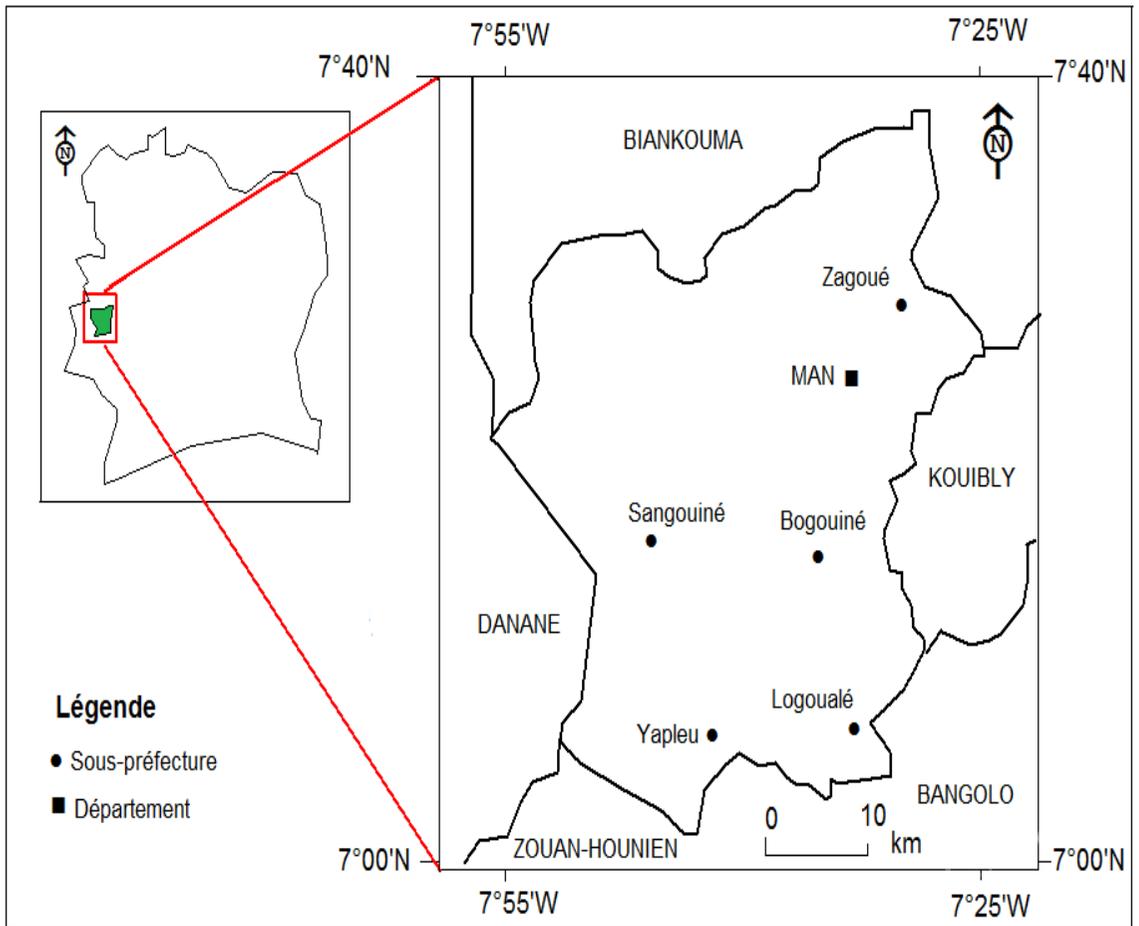


Figure 1: Localisation du département de Man.

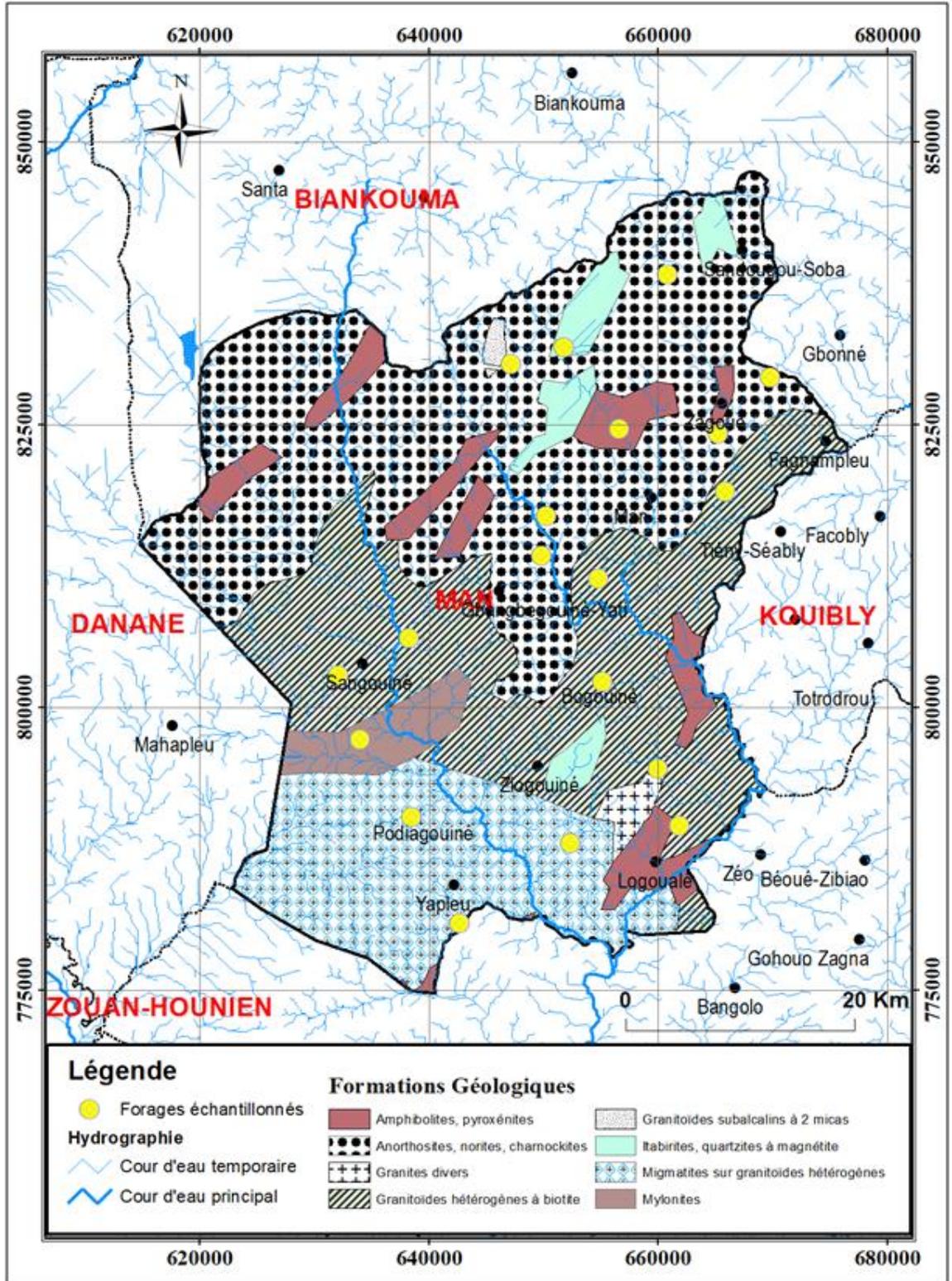


Figure 2: Carte de répartition des points d'échantillonnage dans le département de Man.

RESULTATS

Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques

Le Tableau 1 présente les statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques de la zone d'étude.

Paramètres physiques

L'analyse du Tableau 1 a montré que les eaux souterraines de la zone d'étude avaient des températures qui variaient entre 23,70°C et 31,30°C avec une moyenne de 27,342±1,712°C en saison sèche. Le forage F18 avait la valeur maximale (31,30°C) qui était supérieure à la valeur guide de l'OMS (25°C à 30°C). Pendant la saison pluvieuse, les températures variaient de 23,90°C à 33,60°C avec une moyenne de 28,005±2,164°C. Au cours de cette saison, le forage F3 avait la valeur maximale (33,60°C) de température supérieure à celle de la norme OMS. En saison sèche, la température moyenne journalière varie entre 22°C et 32°C. Par contre, en saison pluvieuse, elle varie entre 21°C et 27°C. Au cours de la saison sèche, les valeurs de la conductivité électrique (CE) ont varié de 113,80 µS/cm à 391,00 µS/cm avec une moyenne de 219,511 ± 90,362 µS/cm. En saison pluvieuse, elles ont varié de 83,40 µS/cm à 376,00 µS/cm avec une moyenne de 206,50 ± 98,352 µS/cm. Les eaux ayant une bonne minéralisation étaient caractérisées par des valeurs de conductivités inférieures à 500 µS/cm (19 forages, soit 100%) pendant la saison pluvieuse et la saison sèche. En saison sèche, les valeurs de pH étaient comprises entre 5,58 et 7,74 avec une moyenne de 6,673±0,541. En saison pluvieuse, les valeurs de pH ont varié de 5,25 à 7,11 avec une moyenne de 6,223±0,441. En saison sèche, 57,89% des eaux souterraines avaient des valeurs de pH situées dans l'intervalle de la norme OMS (6,5 < pH < 8,5) et étaient majoritairement neutres. En saison pluvieuse, 15,79% des eaux souterraines avaient des valeurs de pH situées dans l'intervalle de la norme de l'OMS (6,5 < pH < 8,5). Pendant les deux saisons, les données de température (T°C), conductivité électrique (CE), pH et oxygène dissous (O₂dis) étaient homogènes car CV<50 % et celles de Turbidité (Turb) et du

potentiel redox (Eh) étaient hétérogènes car CV>50 %.

Paramètres chimiques

En saison sèche, les concentrations en calcium (Ca²⁺) ont varié de 13 mg/L à 129 mg/L avec une moyenne de 50,474±37,493 mg/L. Les teneurs en calcium en saison pluvieuse s'inscrivaient dans la gamme de 1,440 mg/L à 49,630 mg/L avec une moyenne de 14,035±10,449 mg/L. Tous les points d'eau présentaient des concentrations inférieures à la valeur guide de l'OMS (100 mg/L) en saison pluvieuse alors qu'en saison sèche, les forages F7, F14 et F17 avec respectivement 129 mg/L, 112 mg/L et 112 mg/L avaient des valeurs supérieures à la norme. Pendant la saison sèche, la teneur de magnésium (Mg²⁺) a varié de 8 mg/L à 80 mg/L pour une moyenne de 28,421 ± 18,928 mg/L. Le magnésium avait des concentrations allant de 1,53 mg/L à 70,74 mg/L pour une moyenne de 10,739 ± 15,493 mg/L pendant la saison pluvieuse. Le forage F3 (80 mg/L) en saison sèche et le forage F1 (70,74 mg/L) en saison pluvieuse avaient des teneurs en magnésium au-dessus de la valeur guide de l'OMS. Les teneurs de potassium (K⁺) ont varié de 1,10 mg/L à 18,90 mg/L avec une moyenne de 3,867 ± 3,941 mg/L pendant la saison sèche et de 0,30 mg/L à 8,90 mg/L avec une moyenne de 2,912 ± 1,973 mg/L pendant la saison pluvieuse. Le forage F2 (18,90 mg/L) avait une teneur de potassium qui dépassait la valeur guide de l'OMS en saison sèche. Les concentrations en chlorures (Cl⁻) obtenues en saison sèche ont varié de 0,010 mg/L à 4,350 mg/L avec une moyenne de 0,938±1,287 mg/L. Les teneurs en chlorures obtenues en saison pluvieuse oscillaient entre 0,010 mg/L à 7,300 mg/L avec une moyenne de 1,264 ± 1,935 mg/L. Toutes ces valeurs étaient inférieures à la valeur guide de l'OMS qui est de 250 mg/L définie pour les eaux de consommation. Les teneurs en sulfate (SO₄²⁻) étaient comprises entre 2 mg/L et 15 mg/L avec une moyenne de 3,526 ± 3,486 mg/L pendant la saison sèche. Les teneurs de sulfate pendant la saison pluvieuse, ont varié de 1 mg/L à 9 mg/L avec une moyenne de 2,316±1,974 mg/L. Ces eaux étaient aptes à la consommation humaine car toutes les valeurs étaient en dessous de la

valeur guide de l’OMS qui est de 250 mg/L. Les ions hydrogencarbonates (HCO_3^-) avaient des concentrations qui variaient de 6,40 mg/L à 132,90 mg/L avec une moyenne de $51,19 \pm 39,172$ mg/L pendant la saison sèche et de 3,40 mg/L à 139,20 mg/L avec une moyenne de $48,389 \pm 36,119$ mg/L pendant la saison pluvieuse. En saison sèche, les teneurs du nitrate (NO_3^-) oscillaient entre 2,50 mg/L et 41,30 mg/L avec une moyenne de $12,175 \pm 8,806$ mg/L. Les teneurs en nitrate en saison pluvieuse ont varié de 0,30 mg/L à 17,90 mg/L avec une moyenne de $2,932 \pm 3,963$ mg/L. Les valeurs de nitrate obtenues étaient inférieures à la valeur guide de l’OMS fixée à 50 mg/L. En saison sèche, les eaux des forages avaient une teneur en nitrite (NO_2^-) qui oscillait entre 0,002 et 0,021 mg/L avec une valeur moyenne de $0,007 \pm 0,006$ mg/L. Les valeurs de nitrites en saison pluvieuse ont varié de 0,002 à 0,08 mg/L avec une moyenne de $0,013 \pm 0,019$ mg/L. Les eaux souterraines en saison pluvieuse et en saison sèche avaient une concentration inférieure à la valeur guide de l’OMS pour la potabilité des eaux de boisson fixée à 3 mg/L. Les teneurs en ammonium (NH_4^+) ont varié de 0,020 mg/L à 0,030 mg/L avec une moyenne de $0,021 \pm 0,002$ mg/L pendant la saison sèche et de 0,010 mg/L à 0,030 mg/L avec une moyenne de $0,020 \pm 0,003$ mg/L pendant la saison pluvieuse. Ces teneurs étaient inférieures à la norme OMS qui est de 1,5 mg/L. Les teneurs en phosphate (PO_4^{3-}) ont varié de 0,19 mg/L à 3,50 mg/L avec une moyenne de $0,962 \pm 1,014$ mg/L pendant la saison sèche et de 0,29 mg/L à 4,20 mg/L avec une moyenne de $1,061 \pm 0,984$ mg/L pendant la saison pluvieuse. Pendant les deux saisons, les valeurs de Na^+ et NH_4^+ étaient homogènes car $\text{CV} < 50\%$. Par contre, les valeurs des autres paramètres chimiques étaient hétérogènes car $\text{CV} > 50\%$ (Tableau 1).

Eléments traces métalliques

Les teneurs en cuivre (Cu^{2+}) ont varié de 0,040 mg/L à 0,110 mg/L avec une moyenne de $0,047 \pm 0,018$ mg/L pendant la saison sèche et de 0,01 mg/L à 0,08 mg/L avec une moyenne de $0,043 \pm 0,017$ mg/L pendant la saison pluvieuse. Les teneurs en fer (Fe^{2+}) ont varié de 0,020 mg/L à 4,490 mg/L avec une moyenne

de $0,417 \pm 1,009$ mg/L pendant la saison sèche et de 0,010 mg/L à 0,490 mg/L avec une moyenne de $0,120 \pm 0,135$ mg/L pendant la saison pluvieuse. D’après les résultats obtenus, on remarquait que les teneurs en fer étaient très importantes dans les eaux des forages F4 (0,42 mg/L) et F7 (0,49 mg/L) en saison pluvieuse et dépassaient la norme OMS. En saison sèche, les forages F5, F7 et F11 avec respectivement 4,49 mg/L, 0,74 mg/L et 0,74 mg/L avaient des teneurs de fer au-dessus de la norme OMS. Les teneurs en aluminium (Al^{3+}) ont varié de 0,005 mg/L à 0,06 mg/L avec une moyenne de $0,011 \pm 0,012$ mg/L pendant la saison sèche et elles étaient comprises entre 0,008 mg/L et 0,06 mg/L avec une moyenne de $0,012 \pm 0,012$ mg/L pendant la saison pluvieuse. Les valeurs des teneurs de cuivre étaient homogènes car $\text{CV} < 50\%$ et celles du fer et de l’aluminium étaient hétérogènes car $\text{CV} > 50\%$ au cours des deux saisons.

Classification hydrochimique des eaux

L’analyse du diagramme de Piper (Figure 3) révélait que les eaux souterraines de la zone d’étude présentaient deux faciès pour la saison sèche et trois faciès pour la saison pluvieuse. En saison sèche, on avait un faciès bicarbonaté calcique et magnésien (84,21% des eaux analysées) et un faciès chloruré calcique et magnésien (15,79% des eaux analysées). En saison pluvieuse, on rencontrait les deux premiers faciès de la saison sèche représentant respectivement 84,21% et 10,53% des eaux analysées et le faciès bicarbonaté sodique et potassique (5,26%).

Analyse en Composantes Principales (ACP)

L’analyse des résultats issus de l’ACP a été faite en saison sèche et en saison pluvieuse.

Saison sèche

Le Tableau 2 récapitule les résultats issus de l’Analyse en Composantes Principales (ACP) en saison sèche (Décembre 2019).

Le facteur F1 est commandé dans sa partie négative par les variables pH, CE, Ca^{2+} et HCO_3^- et dans sa partie positive par la variable Eh. Le groupe de variables Ca^{2+} et HCO_3^- traduit la minéralisation bicarbonatée calcique acquise suite aux interactions eau-

roche. Le regroupement des variables dans la partie négative du facteur F1 signifie que ces variables chimiques sont acquises après un temps de séjour court dans l'aquifère. Le facteur F1 est déterminé par la variable Eh dans sa partie positive à laquelle s'oppose le pH. Eh permet de prévoir l'état des ions chimiques dans l'eau. L'opposition de cette variable avec le pH qui est un indicateur de l'hydrolyse des silicates rend compte de l'influence des conditions du milieu dans l'acquisition de la minéralisation. Le facteur F1 exprime donc le phénomène de minéralisation-temps de séjour. Le facteur F2 est déterminé dans sa partie positive par les variables Cl^- et NO_3^- et à un degré moindre Mg^{2+} , Al^{3+} et Na^+ . Ce regroupement montre que ces paramètres sont mis en solution par le même phénomène. Les nitrates (NO_3^-) ont une origine superficielle et indiquent une pollution d'origine anthropique. Le facteur F2 est un indicateur des apports superficiels et dégradation de la qualité de l'eau.

Le facteur F3 est commandé par l'oxygène dissous (O_2dis) dans sa partie positive et la température ($^{\circ}\text{C}$) dans sa partie négative. En effet, l'oxygène dissous dans l'eau est dépendante de la température. La concentration en oxygène dissous est un paramètre essentiel dans le maintien de la vie, et donc dans les phénomènes de dégradation de la matière organique. La forte présence de matière organique, dans un plan d'eau par exemple, permet aux micro-organismes de se développer tout en consommant de l'oxygène. Dans notre étude, les activités agricoles constituent la source de matières organiques. La dégradation de ces matières organiques se fait rapidement. Le facteur F3 exprime le phénomène de pollution organique des eaux souterraines.

Le facteur 4 est mis en relief par la variable K^+ du côté positif et NO_2^- dans sa partie négative. Les variables K^+ et NO_2^- sont des paramètres de surface qui se retrouvent en profondeur à la suite d'infiltration. En effet, K^+ et NO_2^- proviendraient des engrais utilisés dans les activités agricoles. Le facteur F4 est un indicateur des apports superficiels. Le facteur F5 est dominé dans sa partie négative par SO_4^{2-}

qui semble caractériser une évolution qui s'effectuerait près de la surface du sol. Ces variables ont une origine superficielle et témoignent d'une pollution anthropique. F5 témoigne d'une pollution anthropique. Le facteur 6 met en relief la variable PO_4^{3-} dans sa partie positive et Turb dans sa partie négative. La variable PO_4^{3-} est un paramètre de surface qui se retrouve en profondeur à la suite d'infiltration. En effet, PO_4^{3-} proviendrait des engrais utilisés dans l'activité agricole. Le facteur F6 renseigne donc sur l'origine spatiale des ions par infiltration directe des eaux et la dégradation anthropique de la qualité de l'eau. F6 est un indicateur des apports superficiels.

Saison pluvieuse

Le Tableau 3 récapitule les résultats issus de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) en saison pluvieuse (Novembre 2019).

Le facteur F1 est commandé dans sa partie négative par la variable pH et dans sa partie positive par les variables Eh et K^+ et à un degré moindre Al^{3+} . Le groupe de variables K^+ et Al^{3+} semble caractériser une évolution qui s'effectuerait près de la surface du sol. Ces variables ont une origine superficielle et témoignent d'une pollution anthropique. Le facteur F1 est déterminé par la variable Eh dans sa partie positive à laquelle s'oppose le pH. Eh permet de prévoir l'état des ions chimiques dans l'eau et la direction des réactions chimiques (oxydation ou réduction). L'opposition de cette variable avec le pH qui est un indicateur de l'hydrolyse des silicates rend compte de l'influence des conditions du milieu dans l'acquisition de la minéralisation. Le facteur F1 est considéré comme un axe de minéralisation d'origine à la fois naturelle (contact eau-roche) et anthropique. Le facteur F2 est déterminé dans sa partie positive par les variables HCO_3^- et CE et à un degré moindre $^{\circ}\text{C}$. La variable $^{\circ}\text{C}$ traduit donc l'influence des conditions du milieu sur la répartition des éléments chimiques. Le facteur F2 traduit donc une minéralisation-temps de séjour. Le facteur F3 est commandé par l'oxygène dissous (O_2dis), Na^+ et PO_4^{3-} . La variable PO_4^{3-} est un paramètre de surface qui se retrouve en profondeur à la suite d'infiltration. En effet,

PO_4^{3-} proviendrait des engrais utilisés dans l'activité agricole. Le facteur F3 renseigne donc sur l'origine spatiale des ions par infiltration directe des eaux et la dégradation anthropique de la qualité de l'eau. F3 est un indicateur des apports superficiels et de la dégradation de la qualité de l'eau.

Le facteur 4 est mis en relief par la variable Ca^{2+} dans sa partie négative et à un degré moindre Cl^- et NO_2^- . Ce regroupement montre que ces paramètres sont mis en solution par le même phénomène. Ce sont des paramètres de surface qui se retrouvent en profondeur à la suite d'infiltration. En effet, NO_2^- proviendrait des engrais utilisés dans les activités agricoles. Le facteur F4 renseigne donc sur l'origine spatiale des ions par infiltration directe des eaux superficielles et la dégradation anthropique de la qualité de l'eau. Le facteur F4 est un indicateur des apports superficiels. Le facteur 5 est déterminé par NO_3^- et à un degré moindre Cu^{2+} dans sa partie

négative. Ce regroupement montre que ces paramètres sont mis en solution par le même phénomène. Les nitrates (NO_3^-) ont une origine superficielle et indiquent une pollution d'origine anthropique. F5 exprime le phénomène origine spatiale et dégradation de la qualité de l'eau. Le facteur 6 est mis en relief par la variable Turb dans sa partie positive et à un degré moindre NH_4^+ dans sa partie négative. La variable NH_4^+ est un paramètre de surface qui se retrouve en profondeur à la suite d'infiltration. En effet, NH_4^+ proviendrait des engrais utilisés dans les activités agricoles. La turbidité de l'eau souterraine est généralement surtout inorganique et causée par des facteurs géologiques naturels. Le facteur F6 renseigne donc sur l'origine spatiale des ions par infiltration directe des eaux superficielles et la dégradation anthropique de la qualité de l'eau. Le facteur F6 est un indicateur des apports superficiels.

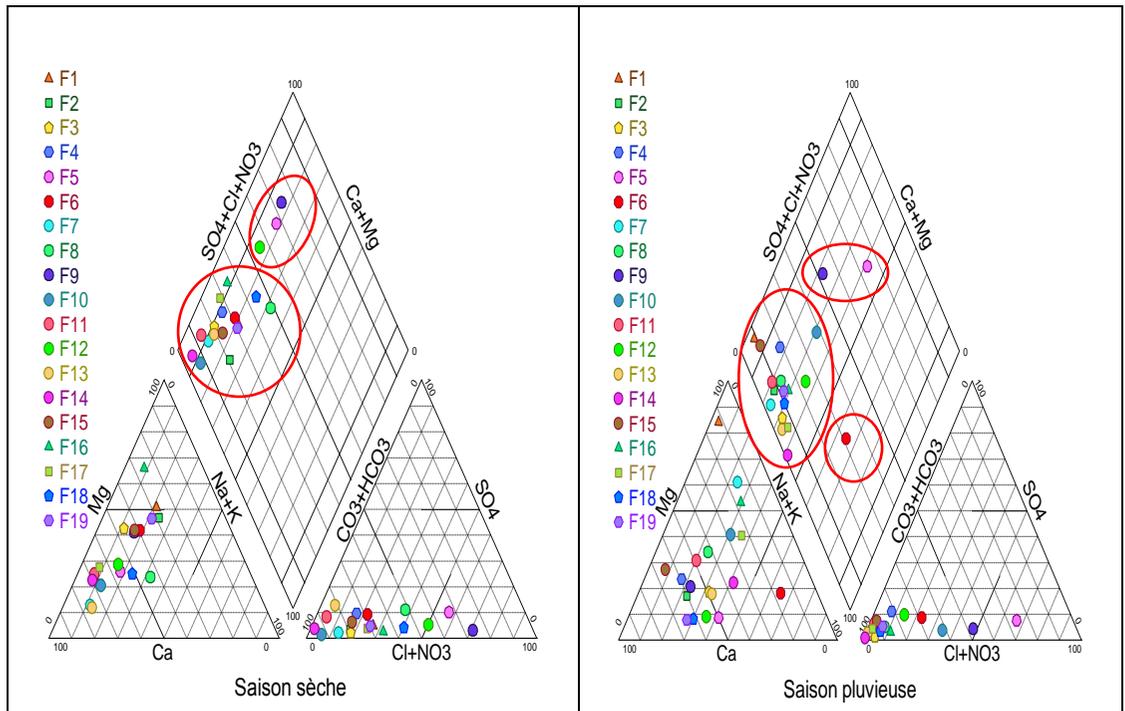


Figure 3: Représentation des eaux souterraines du département de Man dans le diagramme de Piper.

Tableau 1: Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques du département de Man.

Variable	Unité	Saison sèche (Décembre 2019)					Saison pluvieuse (Mars 2019)					Norme OMS (2011)
		Min	Max	Moy	σ	CV (%)	Min	Max	Moy	σ	CV (%)	
T°C	°C	23,700	31,300	27,342	1,712	6,261	23,900	33,600	28,005	2,164	7,727	25 °C à 30°C
Turb	NTU	0,320	2,810	0,759	0,582	76,680	0,490	4,380	1,145	0,914	79,825	< 5
CE	$\mu\text{S}/\text{cm}$	113,800	391,000	219,511	90,362	41,165	83,400	376,000	206,500	98,352	47,628	≤ 500
pH		5,580	7,740	6,673	0,541	8,107	5,250	7,110	6,223	0,441	7,087	6 ,5 < pH < 8, 5
Eh	mV	-28,500	72,700	13,074	27,387	209,477	1,000	100,600	42,995	24,566	57,137	
O ₂ dis	mg/L	2,300	5,600	4,058	0,958	23,608	2,900	6,500	4,937	0,971	19,668	
Ca ²⁺	mg/L	13,000	129,000	50,474	37,493	74,282	1,440	49,630	14,035	10,449	74,449	≤ 100
Mg ²⁺	mg/L	8,000	80,000	28,421	18,928	66,599	1,530	70,740	10,739	15,493	144,268	≤ 50
Na ⁺	mg/L	3,490	17,230	8,567	3,789	44,228	1,030	7,480	4,712	1,802	38,243	≤ 200
K ⁺	mg/L	1,100	18,900	3,867	3,941	101,914	0,300	8,900	2,912	1,973	67,754	≤ 12
Cl ⁻	mg/L	0,010	4,350	0,938	1,287	137,207	0,010	7,300	1,264	1,935	153,085	< 250
SO ₄ ²⁻	mg/L	2,000	15,000	3,526	3,486	98,865	1,000	9,000	2,316	1,974	85,233	< 250
HCO ₃ ⁻	mg/L	6,400	132,900	51,190	39,172	76,523	3,400	139,200	48,389	36,119	74,643	
NO ₃ ⁻	mg/L	2,500	41,300	12,175	8,806	72,328	0,300	17,900	2,932	3,963	135,164	≤ 50
NO ₂ ⁻	mg/L	0,002	0,021	0,007	0,006	85,714	0,002	0,080	0,013	0,019	146,154	≥ 3
NH ₄ ⁺	mg/L	0,020	0,030	0,021	0,002	9,523	0,010	0,030	0,020	0,003	15	$\leq 1,5$
PO ₄ ³⁻	mg/L	0,190	3,500	0,962	1,014	105,405	0,290	4,200	1,061	0,984	92,743	≤ 5
Cu ²⁺	mg/L	0,040	0,110	0,047	0,018	38,298	0,010	0,080	0,043	0,017	39,535	
Fe ²⁺	mg/L	0,020	4,490	0,417	1,009	241,966	0,010	0,490	0,120	0,135	112,5	< 0,3
Al ³⁺	mg/L	0,005	0,060	0,011	0,012	109,090	0,008	0,060	0,012	0,012	100	

Min : Minimum ; **Max** : Maximum ; **Moy** : Moyenne ; σ :Ecartype.

Tableau 2 : Coordonnées des variables et pourcentage de variance selon les axes factoriels en saison sèche (Décembre 2019).

Variable	Fact.1	Fact.2	Fact.3	Fact.4	Fact.5	Fact.6
T°C	0,027	0,205	-0,623	-0,354	-0,032	0,322
Turb	0,057	-0,128	0,081	0,082	0,408	-0,695
CE	-0,653	0,645	-0,033	0,036	-0,153	-0,154
pH	-0,793	-0,195	0,470	-0,022	0,041	-0,003
Eh	0,854	0,226	-0,290	0,252	0,068	0,012
O ₂ dis	0,237	0,254	0,630	-0,120	0,156	0,190
Ca ²⁺	-0,820	0,386	-0,279	-0,080	0,019	0,091
Mg ²⁺	-0,264	0,524	0,445	0,342	0,243	0,272
Na ⁺	-0,422	0,594	-0,118	-0,204	0,468	-0,120
K ⁺	-0,066	0,050	0,383	0,653	0,173	0,090
Cl ⁻	0,529	0,683	0,092	-0,001	-0,433	-0,005
SO ₄ ²⁻	-0,479	-0,170	0,020	-0,160	-0,624	-0,001
HCO ₃ ⁻	-0,799	-0,054	0,044	-0,103	-0,334	0,068
NO ₃ ⁻	0,416	0,759	0,273	-0,312	-0,040	-0,046
NO ₂ ⁻	0,236	-0,373	0,142	-0,691	-0,003	-0,103
NH ₄ ⁺	-0,353	0,284	-0,489	-0,093	0,367	-0,453
PO ₄ ³⁻	0,065	-0,005	-0,174	-0,352	0,546	0,638
Cu ²⁺	0,254	-0,486	0,199	-0,242	0,101	-0,133
Fe ²⁺	0,276	0,132	-0,512	0,501	-0,256	-0,019
Al ³⁺	0,346	0,573	0,302	-0,423	-0,223	-0,254
Valeur propre	4,535	3,284	2,304	2,035	1,779	1,463
% de variance	22,677	16,421	11,518	10,175	8,893	7,315
% cumulé de variance	22,677	39,098	50,616	60,791	69,684	76,999

Tableau 3 : Coordonnées des variables et pourcentage de variance selon les axes factoriels en saison pluvieuse (Mars 2019).

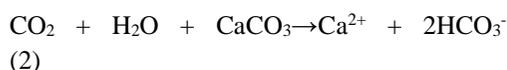
Variable	Fact.1	Fact.2	Fact.3	Fact.4	Fact.5	Fact.6
T°C	0,145	0,564	0,170	-0,404	0,201	0,228
Turb	-0,058	-0,004	-0,035	0,188	0,357	0,620
CE	-0,249	0,862	-0,138	-0,044	-0,181	-0,169
pH	-0,915	0,046	0,013	0,055	0,001	-0,132
Eh	0,920	-0,085	0,013	-0,100	0,006	0,114
O ₂ dis	0,113	0,018	0,856	0,042	0,044	0,160
Ca ²⁺	-0,119	-0,351	0,514	-0,635	0,114	-0,133
Mg ²⁺	-0,234	-0,480	-0,303	-0,160	0,135	0,105
Na ⁺	0,119	0,113	0,667	0,141	-0,376	-0,369
K ⁺	0,743	0,046	0,164	0,211	0,085	0,038
Cl ⁻	0,442	0,289	-0,287	-0,594	-0,373	-0,075
SO ₄ ²⁻	-0,369	0,138	-0,245	-0,343	-0,374	0,300
HCO ₃ ⁻	-0,604	0,662	0,063	0,181	-0,130	0,076
NO ₃ ⁻	0,250	-0,332	-0,202	0,359	-0,601	-0,251
NO ₂ ⁻	-0,558	-0,499	-0,014	-0,573	0,101	-0,147
NH ₄ ⁺	-0,112	-0,040	-0,479	0,113	0,435	-0,555
PO ₄ ³⁻	-0,325	-0,188	0,663	-0,131	-0,252	-0,014
Cu ²⁺	-0,117	-0,548	-0,250	0,113	-0,563	0,361
Fe ²⁺	0,252	-0,174	0,160	0,104	0,248	-0,217
Al ³⁺	0,594	0,155	-0,266	-0,501	-0,073	-0,099
Valeur propre	4,037	2,731	2,624	1,974	1,686	1,368
% de variance	20,185	13,655	13,120	9,872	8,431	6,842
% cumulée de variance	20,185	33,840	46,960	56,832	65,263	72,105

DISCUSSION

Les analyses des eaux souterraines du département de Man ont montré que les eaux sont acides au cours des deux saisons. En effet, l'acidité des eaux a été observée dans plusieurs régions du pays. Il s'agit entre autres des régions de Tiassalé (Oga et al., 2009), de San-Pedro (Lasm et al., 2011), du bassin versant du Haut Bandama (Soro, 2014), de la région Centre de la Côte d'Ivoire (Ehoussou et al., 2019 ; Soro et al., 2019). Cette acidité des eaux en zone tropicale humide est selon Matini et al. (2009), Ehoussou et al. (2019) principalement liée à la décomposition de la matière organique végétale, avec la production de CO₂ dans les premières couches du sol. Aussi, la présence dans l'eau de CO₂ provenant des sols facilite l'hydrolyse des minéraux silicatés et la formation des ions HCO₃⁻, qui constituent les ions les plus importants dans la zone d'étude. Les eaux de la zone d'étude ont une conductivité électrique moyenne de 219,511 µS/cm en saison sèche et 206,500 µS/cm en saison pluvieuse. Ces eaux souterraines sont dans l'ensemble peu minéralisées, ce qui est conforme à un trait chimique bien reconnu dans le pays. En saison pluvieuse, la valeur moyenne du potentiel redox (Eh) est de 42,995 mV tandis qu'en saison sèche, elle est de 13,074 mV. Ces valeurs moyennes d'Eh sont inférieures à celle obtenue par Soro (2014) dans le bassin versant du Haut Bandama qui est de 147,7 mV. Les valeurs positives obtenues signifient que les eaux sont bien oxygénées et qu'elles appartiennent à un système ouvert à l'atmosphère (Soro, 2014). Les valeurs très élevées du potentiel d'oxydo-réduction sont le signe d'une pollution anthropique (Lallahem, 2002). Les nitrates des eaux souterraines de la région proviennent en grande partie des pesticides et des engrais utilisés dans les activités agricoles. Les travaux de Gibrilla et al. (2010) menés dans le bassin de la rivière Densu au Ghana s'accordent avec cette origine et soulignent que les nitrates peuvent provenir également de la nitrification des plantes

légumineuses et des excréments des animaux. Les teneurs en éléments traces métalliques observées dans les eaux de la zone sont faibles, à l'exception du fer qui a une moyenne de 0,417 mg/L en saison sèche supérieure à la valeur guide de l'OMS (< 0,3 mg/L). L'origine de ce métal dans les eaux étudiées pourrait être associée à la nature géologique des formations aquifères et du substratum rocheux qui les abritent comme l'ont signalé Mangoua et al. (2010) dans le bassin versant de la Baya. En effet, le département de Man constitue la zone où l'on rencontre les plus grands gisements métalliques de la Côte d'Ivoire. La géologie de la zone se caractérise par la présence des roches mafiques et ultramafiques riches en minéraux ferromagnésiens. De nombreux gisements abritant des métaux précieux ont été mis en évidence et certains font actuellement l'objet d'une exploration : c'est le cas du gisement de fer du Mont Klahoyo (Ahoussi et al., 2017). D'autre part, l'origine du fer peut être liée aux phénomènes d'oxydo-réduction comme l'ont signalé Oga et al. (2009) dans la région de Tiassalé. Tous les points d'eau analysés ont des teneurs de nitrates largement en-dessous de la norme OMS qui est de 50 mg/L en saison sèche et en saison pluvieuse. L'utilisation des techniques d'analyse statistique multivariée en particulier l'ACP pour l'étude du chimisme des eaux souterraines a révélé trois phénomènes responsables de la minéralisation des eaux dans les aquifères de fissures de la zone. Les principaux phénomènes sont la minéralisation-temps de séjour, l'apport superficiel et la dégradation anthropique de la qualité des eaux et la pollution organique. L'acquisition des ions se fait de façon rapide par l'hydrolyse acide des silicates et les interactions eaux-roches qui constituent les mécanismes importants dans la minéralisation des eaux. Les granites, les gneiss et les schistes sont riches en feldspaths alcalins et en plagioclases acides. Ces roches dominent la géologie du département comme dans plusieurs régions du socle cristallophyllien ivoirien. L'hydrolyse de telles roches explique les teneurs en Ca²⁺, Mg²⁺

dominantes pour les cations dans les eaux souterraines (Souley et al., 2018). En effet, selon Montcoudiol et al. (2015), la dissolution de l'anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) ou de la calcite (CaCO_3) est donnée par les équations 1 et 2 suivantes :



L'acidité des eaux et l'abondance des précipitations provoquent une altération très intense et complète des minéraux primaires de la roche mère par hydrolyse (Eblin et al., 2014). Cette hydrolyse est donc importante en saison pluvieuse qu'en saison sèche. La présence du NO_2^- , NO_3^- et PO_4^{3-} et de métaux lourds indiquerait une pollution liée aux activités anthropiques dans le processus de la minéralisation des eaux. Ceci se justifierait par l'utilisation de fertilisants au cours des activités agricoles comme le soulignent El Amrani-Paaza et al. (2007) de même que Ben Moussa et al. (2019) dans la basse vallée de Medjerda en Tunisie Nord-Orientale. Hailé et al. (2020) confirment la même origine pour ces ions et ajoutent d'autres origines telles que les puits perdus domestiques, les effluents industriels et la dissolution de $(\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH})$.

Conclusion

Cette étude avait pour but de comprendre le fonctionnement hydrochimique des eaux souterraines du département de Man dans l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Les analyses physico-chimiques montrent que les eaux souterraines du département de Man sont acides au cours des deux saisons. Les eaux sont peu minéralisées dans l'ensemble avec des moyennes de conductivités qui oscillent entre 206,50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 219,51 $\mu\text{S}/\text{cm}$ observées respectivement pendant la saison pluvieuse et la saison sèche. Les eaux souterraines de la zone étaient globalement de bonne qualité car les teneurs des différents paramètres physico-chimiques respectaient pour la plupart la norme de potabilité de l'OMS. Le fer avait une valeur

moyenne de 0,42 mg/L en saison sèche au-dessus de la valeur guide de l'OMS (0,3 mg/L). Ces eaux présentaient un faciès bicarbonaté calcique et magnésien majoritaire à 84,21% et un faciès chloruré calcique et magnésien minoritaire qui représentait 15,79% en saison sèche. En saison pluvieuse, ces eaux présentaient un faciès bicarbonaté calcique et magnésien majoritaire à 84,21%, un faciès chloruré calcique et magnésien minoritaire (10,53%) et un faciès bicarbonaté sodique et potassique (5,26%). Les différents phénomènes responsables de l'acquisition du chimisme des eaux souterraines de la zone d'étude étaient : la minéralisation-temps de séjour, l'apport superficiel et la dégradation anthropique de la qualité des eaux et la pollution organique.

CONFLIT D'INTERÊTS

Les auteurs déclarent qu'il n'existe aucun conflit d'intérêt lié à cet article.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

Ce travail est le fruit d'une collaboration entre les auteurs. AT a initié les missions d'échantillonnage auxquelles il a participé et financé les analyses. LJAY a traité les données et a fait le montage du projet d'article. TDS a lu le projet et apporté des corrections. BD a initié ce projet de recherche et l'a supervisé.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les communautés villageoises pour leur accueil lors des missions d'échantillonnage et plus particulièrement les chefs de villages.

REFERENCES

- Adjiri OA, Koné B, Aka N, Djabakaté I, Dibi B. 2019. Caractérisation physico-chimique et source de la minéralisation des eaux souterraines des départements de Daloa et Zoukougbeu, Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and*

- Chemical Sciences*, **13**(4): 2388-2401. DOI: 10.4314/ijbcs.v13i4.40
- Ahoussi KE, Koffi YB, Kouassi AM, Soro G, Soro N, Biémi J. 2012. Étude des caractéristiques chimiques et microbiologiques des ressources en eau du bassin versant du N'zi : cas de la commune de N'zianouan (Sud de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **6**(4): 1854-1873. DOI:10.4314/ijbcs.v6i4.40
- Ahoussi KE, Koffi YB, Kouassi AM, Soro G, Biémi J. 2013. Étude hydrochimique et microbiologique des eaux de source de l'Ouest montagneux de la Côte d'Ivoire : Cas du village de Mangouin-Yrongouin (sous-préfecture de Biankouman). *Journal of Applied Biosciences*, **63**: 4703-4719. DOI: 10.4314/jab.v63i1.87245
- Ahoussi KE, Keumean KN, Kouassi AM, Koffi YB. 2017. Etude des caractéristiques hydrogéochimiques et microbiologiques des eaux de consommation de la zone périurbaine de la ville de Man: cas du village de Kpangouin (Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **11**(6): 3018-3033. DOI:10.4314/ijbcs.v11i6.37
- Akatumbila L, Mabiala M, Lubini A, Pwema K, Musibono EA. 2016. Contribution à l'évaluation de la qualité physico-chimique de l'eau : cas de la rivière urbaine Gombe de Kinshasa/République Démocratique du Congo. *Larhyss Journal*, **26**: 7-29.
- Ben Moussa A, Mzali H, Elmejri H, Bel Haj Salem S. 2019. Apport des outils hydrogéochimiques à l'évaluation de la qualité et de l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation : cas de la nappe phréatique de la basse vallée de Medjerda, Tunisie Nord-Orientale. *La Houille Blanche*, **5-6**: 35-44. DOI: 10.1051/lhb/2019053
- Camil J. 1984. Pétrographie et chronologie des ensembles granulites archéens et formations associées de la région de Man (Côte d'Ivoire). Implications pour l'histoire géologique du craton Ouest africain. Thèse de Doctorat en Sciences Naturelles, Université d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 306 p.
- De Marsily G, Besbes M. 2017. Les eaux souterraines. *Responsabilité et Environnement*, **2**(86): 25-30.
- Djro SC. 1998. Evolutions tectono-métamorphiques des gneiss granulitiques archéens du secteur de Biankouma-Touba (Nord-Ouest Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat en Sciences Naturelles, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 121 p.
- Eblin SG, Soro GM, Sombo AP, Aka N, Kambiré O, Soro N. 2014. Hydrochimie des eaux souterraines de la région d'Adiaké (Sud-Est côtier de la Côte d'Ivoire). *Larhyss Journal*, **17**: 193-214.
- Ehoussou KM, Kouassi AM, Kamagaté B. 2019. Caractérisation hydrogéochimique des aquifères fissurés de la région du bélier, Centre de la Côte d'Ivoire. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, **33**:137 - 160
- El Amrani-Paaza N, Larocque M, Banton O, Benavente J. 2007. Simulation de la contamination des eaux souterraines du delta du rio Adra et eutrophisation des albuferas (Almérie, Espagne). *Revue des Sciences de l'Eau*, **20**(1):15-25. DOI: <https://doi.org/10.7207/014904ar>
- Gibrilla A, Osae S, Akiti TT, Adomako D, Ganyaglo SY, Bame PK, Hadisu A. 2010. Hydrogeochemical and groundwater quality studies in the Northern part of the Densu river basin of Ghana. *Journal of Water Resource and Protection*, **2**(12): 1071-1081. DOI: 10.4236/jwarp.2010.212126
- Goné DL. 2001. Contribution des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines à l'étude du fonctionnement des systèmes hydrauliques en milieu fissuré de la région semi-montagneuse de Man (Ouest

- de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat 3^e cycle, Université d'Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 182 p.
- Hussein MT. 2004. Hydrochemical evaluation of groundwater in the Blue Nile basin, eastern Sudan, using conventional and multivariate techniques. *Hydrogeology Journal*, **12**(2): 144-158. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12403-011-0044-9>
- Haile AS, Douglas RT, Kevin MB, Damien TM, Michael JR, Luke J, Tesfamichael GT, Asmelash TA. 2020. Development of an improved hydrogeological and hydro-geochemical conceptualization of a complex aquifer system in Ethiopia. *Hydrogeology Journal*, **28**(8): 2727–2746. DOI: 10.1007/s10040-020-02229-4
- INS. 2014. Recensement Général de la Population et de l'Habitat 2014 : Répertoire des localités du Tonkpi. Rapport de l'INS, Côte d'Ivoire, 56 p.
- Kouamé KF. 2011. Influences de la variabilité climatique et de la dégradation environnementale sur le fonctionnement de l'hydrosystème du N'zo dans la région guinéenne humide et semi-montagneuse de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'Etat es Sciences Naturelles, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 374 p.
- Kouamelan AN. 1996. Géochronologie et géochimie des formations archéennes et Protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition archéen-protérozoïque. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, France, 277 p.
- Lallahen S. 2002. Structure et modélisation hydrodynamique des eaux souterraines : Application à l'aquifère crayeux de la bordure nord du bassin de Paris. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 242 p.
- Lasm T, De Lasme O, Oga YMS, Youan Ta M, Baka D, Kouamé F, Yao KT. 2011. Caractérisation hydrochimique des aquifères fissurés de la région de San-Pedro (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **5**(2): 642-662. DOI: 10.4314/ijbcs.v5i2.72129
- Matini L, Moutou JM, Kongo-Mantono MS. 2009. Evaluation hydro-chimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud-Ouest de Brazzaville, Congo. *Afrique Science*, **5**(1):82-98. DOI: 10.4314/afsci.v5i1.61709
- Mangoua OMJ, Touré S, Goula BTA, Yao KB, Savané I, Biémi J. 2010. Évaluation des caractéristiques des aquifères fissurés du bassin versant de la Baya ou Bâ (Est de la Côte d'Ivoire). *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, **16**: 243- 259.
- Mangoua OMJ, Konan KS, Kouamé KI, Zougrou NN, Kouassi KL, Savané I, Biémi J. 2018. Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du département de Tiassalé (Sud de la Côte d'Ivoire). *Environmental and Water Science, Public Health & Territorial Intelligence Journal*, **2**(2): 46-54.
- Montcoudiol N, Molson J, Lemieux JM. 2015. Groundwater geochemistry of the Outaouais Region (Québec, Canada): a regional-scale study. *Hydrogeology Journal*, **23**(2): 377-396. DOI : 10.1007/s10040-014-1190-5
- Oga YMS, Lasm T, Yao KT, Soro N, Saley MB, Kouassi D, Gnamba F. 2009. Caractérisation chimique des eaux des aquifères de fracture: Cas de la région de Tiassalé en Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, **31**(1): 72-87.
- OMS. 2011. *Directives de Qualité pour l'Eau de Boisson*. OMS : Genève-Suisse.
- Ouattara A, Méité A, Dally T, Ouattara H, Coulibaly KS. 2016. Étude de la qualité des eaux de consommation dans la localité de N'Zianouan s/p de Tiassalé et des quartiers précaires de trois communes du District d'Abidjan (Koumassi,

- Treichville, Attécoubé). *Journal of Applied Biosciences*, **102**: 9708-9715.
- Sarallier C. 2003. Eau et développement. Bibliographique Thématique, 27 p.
- Soro G, Soro TD, Fossou NMR, Adjiri OA, Soro N. 2019. Application des méthodes statistiques multivariées à l'étude hydrochimique des eaux souterraines de la région des lacs (Centre de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **13**(3): 1870-1889. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v13i3.54>
- Soro TD. 2014. Evolution des ressources en eau du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire) dans un contexte de variabilité et de changement climatiques : impacts hydrologiques, hydrogéologiques et hydrochimiques. Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire, 243 p.
- Souley MR, Malam AMM, Mahaman SL, Natatou I, Issa H. 2018. Caractérisation physico-chimique des eaux souterraines du socle de la région de Zinder (Niger) pendant la saison des pluies et la saison sèche. *European Scientific Journal*, **14**(27): 317-345. DOI: 10.19044/esj.2018.v14n27p317
- Traoré A, Ahoussi KE, Aka N, Traoré A, Soro N. 2015. Niveau de contamination par les pesticides des eaux des lagunes Aghien et Potou (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Pure & Applied Bioscience*, **3**(4): 312-322.
- UNICEF/OMS. 2019. Progrès en matière d'eau, d'assainissement et d'hygiène des ménages 2000-2017 : gros plan sur les inégalités. UNICEF/OMS, Suisse, 140 p.
- Yidana SM, Ophori D, Banoeng-Yakubo B. 2007. Hydrogeological and hydrochemical characterization of the Voltaian Basin: the Afram Plains area, Ghana. *Environmental Geology*, **54**(9): 1751-1762. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0710-1>.