

Suivi de la qualité physico-chimique des eaux du Sassandra à la station hydrométrique de Gaoulou, Sud-ouest de la Côte d'Ivoire

Yao Dakro Albert GBOKO^{1*}, Natchia AKA², Keiba Noël KEUMEAN¹ et Nagnin SORO¹

¹ *Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, UFR des sciences de la terre et des ressources minières (STRM), Laboratoire des Sciences du Sol de l'Eau et des Géomatériaux (SSEG), 01 BPV 34 Abidjan 01 Côte d'Ivoire*

² *Centre de Recherches Océanologiques (CRO), Département Environnement, Laboratoire de Physique et de Géologie Marine (PHYGEM), 29 Rue des Pêcheurs, 01 BP V 18 Abidjan, Côte d'Ivoire*

(Reçu le 01 Août 2022 ; Accepté le 05 Septembre 2022)

* Correspondance, courriel : dakroalbert@yahoo.fr

Résumé

L'objectif de ce travail est de suivre la qualité physico-chimique des eaux du fleuve Sassandra à sa station hydrométrique de Gaoulou. Pour ce faire 12 missions mensuelles de Septembre 2019 à août 2020 ont été organisées. Sur le terrain la température, le pH et la CE ont été mesurés à l'aide d'un multiparamètre de type HACH HQ 40 D et d'un pH-mètre de type "WTW". La turbidité, les anions majeurs ont été analysés au Centre de Recherches Océanologiques (CRO) avec un turbidimètre de type HACH 2100 QiS ; un spectrophotomètre de type HACH DR 6000 et un titrimètre digital de type HACH. Les cations (majeurs et ETM) ont été dosés par Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA) au LANADA. Les résultats montrent que les eaux du fleuve Sassandra sont peu minéralisées (CE moyenne = 78,5 μ S/cm) avec un pH moyen légèrement basique (7,1). La majorité des valeurs de la turbidité avec une moyenne de 10,2 NTU situe ces eaux dans la classe des eaux légèrement troubles. Dans l'ensemble, les éléments majeurs dont les plus dominants sont HCO_3^- (avec une moyenne de 29,48 mg/L) et SiO_2 (moyenne : 19,07mg/L) ont des concentrations faibles. Parmi les ETM, le fer est l'élément le plus abondant avec une moyenne de 478 μ g/L. Les concentrations des autres ETM sont très faibles. Au vu de ces résultats, la qualité des eaux du Sassandra vis-à-vis des éléments étudiés est acceptable.

Mots-clés : *qualité, physico-chimique, ETM, bassin versant, Sassandra, Côte d'Ivoire.*

Abstract

Monitoring of the physico-chemical quality of the waters of the Sassandra at the hydrometric station of Gaoulou, South-West of Côte d'Ivoire

The objective of this work is to monitor the physicochemical quality of the waters of the Sassandra River at its hydrometric station in Gaoulou. To do this, 12 monthly missions from September 2019 to August 2020 have been organized. In the field, temperature, pH and EC were measured using a HACH HQ 40 D type multiparameter and a "WTW" type pH meter. Turbidity and major anions were analyzed at the Centre de Recherches Océanologiques (Oceanological Research Center) (CRO) with a HACH 2100 QiS type turbidimeter; a HACH DR 6000 type spectrophotometer and a HACH type digital titrator. The cations (major and ETM) were

assayed by Atomic Absorption Spectrometry (AAS) at LANADA. Results show that the waters of the Davo river are poorly mineralized (EC average = 78.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$) with a slightly basic average pH (7.1). The majority of turbidity values with an average of 10.2 NTU place these waters in the class of slightly cloudy waters. Overall, the major elements, the most dominant of which are HCO_3^- (with an average of 29.48 mg/L) and SiO_2 (average: 19.07 mg/L) have low concentrations. Among the MTE, iron is the most abundant element with an average of 478 $\mu\text{g}/\text{L}$. The concentrations of the other MTE are very low. In view of these results, the quality of the waters of the Sassandra River with respect to the elements studied is acceptable.

Keywords : *quality, physico-chemical, ETM, watershed, Sassandra, Côte d'Ivoire.*

1. Introduction

Le sixième Objectif du Développement Durable de l'UNESCO (ODD6) vise un accès universel et équitable à l'eau potable, à l'hygiène et à l'assainissement d'ici 2030, en particulier pour les populations vulnérables [1]. Pour répondre à cet objectif, l'État de Côte d'Ivoire a consenti de nombreux efforts à travers des systèmes d'adduction en eau potable qui captent les eaux souterraines ou de surface [2, 3]. Les localités situées à l'intérieur du pays sont à 85 % alimentées via les eaux souterraines [4]. Ce choix s'explique par la qualité de ces eaux qui répond aux normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), mais aussi par le fait que les eaux souterraines offrent des débits qui peuvent répondre aux besoins des populations [5, 6]. Cependant, les eaux souterraines souffrent de plusieurs problèmes dont leur tarissement en période de sécheresse à cause de la variabilité climatique [7]. Des études menées sur le bassin sédimentaire [8] et sur le socle [9] montrent une diminution de la recharge des nappes. Aussi, l'augmentation de la demande consécutive à la croissance démographique et surtout au taux d'échec élevé lors de la réalisation des forages ne favorisent-ils pas l'utilisation des eaux souterraines [10]. La population ivoirienne est passée de 22 000 000 d'habitants en 2014 à plus de 29 000 000 d'habitants en 2021 [11, 12]. Ces problèmes obligent l'État de Côte d'Ivoire à faire le choix des eaux de surface qui fournissent de grands débits pour l'alimentation en eau potable des grandes agglomérations de l'intérieur du pays. Ces eaux issues de lacs, de barrages et des cours d'eaux, présentent une grande vulnérabilité à la pollution à cause des activités anthropiques. Ainsi, une pollution métallique et une contamination des eaux en microorganismes ont été signalées dans le bassin versant du N'zi [13] sur le socle et dans les eaux des lagunes Potou et Aghien [14]. Dans les eaux de surface de la région de Bonoua [15] et d'Adiaké [16] c'est une pollution métallique qui a été mise en évidence. Comme la plupart des grandes villes de l'intérieur du pays, la ville de Sassandra est alimentée en eau potable via l'eau captée à Gaoulou sur le fleuve Sassandra à une quinzaine de kilomètres en amont. Face à la perturbation des débits du cours d'eau par les travaux (barrage de Gribo-popoli) puis à la variabilité climatique en général, et à la pollution des eaux de surface par les activités anthropiques en particulier, ce travail se propose de suivre la qualité physico-chimique des eaux du fleuve Sassandra à sa station de Gaoulou. Ce travail est une contribution pour identifier les éléments à contrôler lors du traitement de l'eau destinée à la consommation des populations et aussi à maintenir un bon équilibre écologique du milieu aquatique.

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation de la zone d'étude

Deuxième bassin versant ivoirien de par sa superficie (75 000 km^2 dont 8000 km^2 sont situés hors du territoire ivoirien) après celui du Bandama, le bassin versant du Sassandra est situé entre 5° et $9^\circ 50'$ de latitude nord, et $6^\circ 50'$ et 8° de longitude ouest (**Figure 1**). La répartition du climat du bassin versant est la suivante [17] :

la partie nord du bassin est couverte par le climat tropical de transition. Cette zone est située au nord de la parallèle passant par Touba. Dans cette zone la répartition mensuelle des pluies est unimodale (alternance entre deux saisons : saison sèche de novembre à avril et saison pluvieuse de juillet à octobre). À l'Ouest notamment dans la région de Man, règne le climat de montagne avec une répartition pluviométrique unimodale. La saison pluvieuse couvre les mois de mai à septembre et la saison sèche part de novembre à mars-avril. Dans la partie septentrionale et dans le sud du bassin règne respectivement le climat équatorial de transition atténué et le climat équatorial de transition. La répartition de la pluviométrie est bimodale (alternance de quatre saisons). La grande saison des pluies part d'avril à mi-juillet, la petite saison des pluies s'étend sur la période de mi-septembre à novembre, les périodes sèches sont marquées par une faible précipitation de mi-juillet à mi-septembre (petite saison sèche) puis de décembre à février. La répartition des débits mensuels au cours de l'année est présentée sur la **Figure 2** pour les périodes allant de 1962 à 2004 et de septembre 2019 à août 2020. Le module annuel est de 488,7 m³/s pour les données historiques et 579,4 m³/s pour la période d'étude. Il comporte au Sud, au Centre et à l'Ouest, une zone forestière, puis au Nord, une zone de savane. La population du bassin versant est estimée à 4 938 590 habitants en 2014 [11]. L'activité principale des populations est l'agriculture qui utilise des intrants. La géologie du bassin versant du Sassandra se subdivise en deux grands domaines à savoir le domaine Archéen à l'Ouest appelé « Kenema-Man » et le domaine Paléoprotérozoïque appelé « Baoulé-Mossi » à l'Est, séparés par l'accident majeur de Sassandra. L'essentiel du domaine archéen (plus de 80%) est constitué par les formations libériennes qui se trouvent essentiellement dans la région de Man. Ces formations sont composées de granulites, de migmatites et d'amphibolo-pyroxénites qui sont des métas-sédiments catazonaux [18, 19]. À ces formations libériennes, sont associées de nombreuses reliques de formations léoniennes essentiellement représentées par un complexe de base cristallin constitué de migmatites et de gneiss granulitiques, connu aussi sous le nom de granito-gneiss et les ceintures supracrustales. À ces deux ensembles s'associent des granites et des charnockites sous forme d'intrusion dans le socle granito-gneissique, ou sous forme de mobilisation anatectique [19]. Le domaine Paléoprotérozoïque est constitué d'un socle granito-gneissique et de formations volcano-sédimentaires. Les formations volcano-sédimentaires sont essentiellement des métasédiments et des roches vertes (métavulcanites). Les métasédiments sont constitués en majeure partie de grès et de schistes. Les roches vertes sont constituées de metabasalte, métaandésite, métadolérite et métagabbro [19]. Les sols du bassin versant du fleuve Sassandra appartiennent aux classes des sols ferralitiques à l'ouest et au sud, des sols ferrugineux à l'extrême nord et des sols hydromorphes près des cours d'eau [20]

2-2. Méthode d'échantillonnage

Les campagnes d'échantillonnages d'eau se sont effectuées à la station hydrométrique de Gaoulou de coordonnées 816001 E et 557606 N. Ces campagnes couvrent une période de douze (12) mois de septembre 2019 à août 2020. Des flacons en polyéthylène de 1L ont servi au prélèvement des eaux destinées aux analyses des anions majeurs puis aux MES. Quant aux cations, des flacons en polyéthylène de 50 mL ont été utilisés, avec ajout de 0,25 mL d'acide nitrique (HNO₃). Les échantillons sont placés dans une glacière puis recouverts de glace pendant leur transport au laboratoire. Au laboratoire les échantillons sont conservés à une température inférieure à 4°C. Les paramètres comme la température (T°), le pH, la Conductivité Électrique (CE) ont été déterminés *in situ* à l'aide d'un multiparamètre de type HACH HQ 40 D et d'un pH-mètre de type "WTW".

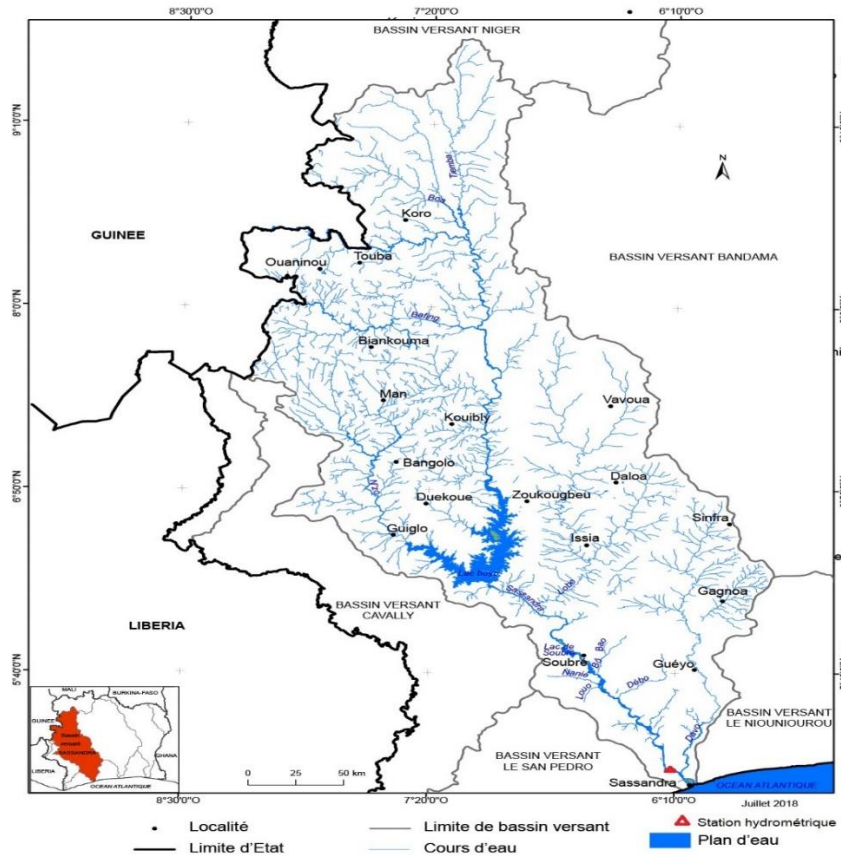


Figure 1 : *Présentation du bassin versant du Sassandra*

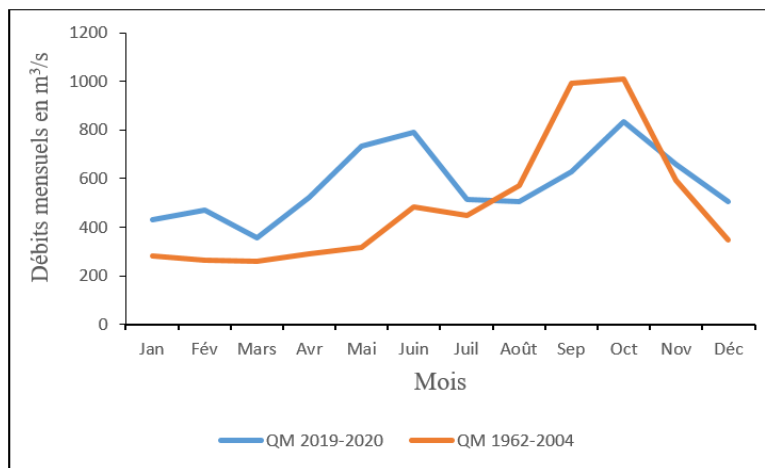


Figure 2 : *Hydrogramme du Sassandra à Gaoulou sur la période 1962-2004 et septembre 2019- août 2020. Les mois de septembre à décembre appartient à 2019 et janvier à août à 2020 pour QM 2019-2020*

2-3. Méthodes d’analyse des données

Les MES, la turbidité et les anions ont été dosés au laboratoire de chimie du Centre de Recherches Océanologiques (CRO). Les MES correspondent à des particules de faibles tailles ou densités qui limitent leur chute par gravité dans l’eau. La méthode gravimétrique [21] est celle qui a été utilisée pour leur détermination. Cette méthode consiste à filtrer un échantillon d’eau d’au moins 100 mL sur une membrane

poreuse. La membrane utilisée est en microfibre de verre de type Wathman GF/C de porosité $1,2 \mu\text{m}$ et de diamètre 47 mm. Ce filtre est séché au préalable à 105°C à l'étuve pendant 2 h puis pesé à l'aide d'une balance et on obtient une masse M_1 . Après filtration d'un volume (v) d'eau, le filtre est séché puis pesé à nouveau et on obtient une masse M_2 . Les concentrations en MES sont déterminées à l'aide du rapport suivant :

$$\text{MES (mg/L)} = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (1)$$

M_1 étant la masse en mg du filtre avant filtration ; M_2 la masse du filtre après filtration, séchage et V le volume filtré en litre.

Au laboratoire, la turbidité qui est définie comme la réduction de la transparence d'un liquide par la présence de matières non dissous [22] a été déterminée par la méthode néphélométrique à l'aide d'un turbidimètre de type "HACH 2100 QiS". Le principe est de mesurer l'intensité de la lumière dispersée à un angle de 90° par rapport à la lumière incidente. Cette diffusion est liée aux MES et surtout à leur taille, à leur forme et à l'indice de réfraction des particules [23]. L'unité retenue est le "Nephelometric Turbidity Unit" (NTU) proposée par l'US-EPA. La méthode est décrite par la norme NF EN ISO 7027 (2000) [24]. Les anions (SO_4^{2-} , NO_3^-) ont été dosés à l'aide d'un spectrophotomètre de type HACH DR 6000. Le dosage des sulfates a été fait par colorimétrie par la méthode au Sulfaver 4. Les ions sulfates de l'échantillon réagissent avec le baryum du SulfaVer 4 pour former un précipité de sulfate de baryum. L'intensité de la turbidité est proportionnelle à la concentration en sulfate. La lecture est obtenue à 450 nm à l'aide d'un spectrophotomètre. Les nitrates ont été déterminés par la méthode de réduction au cadmium. Le cadmium réduit le nitrate dans l'échantillon en nitrite. L'ion nitrite réagit avec l'acide sulfanilique pour former un sel de diazonium intermédiaire. Ce sel réagit avec l'acide gentisique pour former un complexe coloré ambré. La lecture est obtenue à 400 nm au DR 6000. Les Chlorures (Cl^-) ont été dosés par volumétrie par la méthode de Thio cyanate Mercurique. Quant aux bicarbonates (HCO_3^-), leur dosage également a été réalisé par volumétrie en déterminant le titre alcalimétrique complet (TAC) puisque le titre alcalimétrique est nul quand le pH est inférieur à 8,3. Ces deux éléments ont été dosés par un titrimètre digital de type HACH. Les cations majeurs (Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ et K^+) et les ETM (Fe^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{2+} , Pb^{2+} , Hg^{2+}) ont été dosés au Laboratoire National d'appuis au Développement Agricole (LANADA) par Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA). Cette méthode utilise la propriété qu'ont les atomes neutres à absorber à une certaine longueur d'onde, un quantum d'énergie. Les concentrations totales des éléments ont été dosées dans l'eau brute. Les cations majeurs, le fer (Fe) et le cuivre (Cu) ont été dosés par la technique SAA à flamme air-acétylène oxydante selon les longueurs d'onde spécifiques à chaque élément. Le plomb (Pb) et le chrome (Cr) ont été déterminés par la technique du SAA au four. Quant au mercure (Hg), c'est la technique SAA à l'hydrure qui a été utilisée. La silice a été déterminée par colorimétrie par la méthode au silicomolybdate. La silice et le phosphate de l'échantillon réagissent avec l'ion molybdate en conditions acides pour former des complexes d'acides silicomolybdique et phosphomolybdique de couleur jaune. L'adjonction d'acide citrique entraîne la destruction des complexes phosphates. La silice est ensuite déterminée en mesurant le résidu de couleur jaune. La lecture est obtenue à 452 nm au "DR 6000".

3. Résultats

3-1. Paramètres *in situ* et MES

Les statistiques élémentaires des paramètres *in situ* et des MES sont présentés dans le **Tableau 1**. La température varie de $26,4^\circ\text{C}$ en juin à $30,6^\circ\text{C}$ en décembre avec une moyenne de $28,3^\circ\text{C}$ et un écart-type de 1,5. Les valeurs du pH oscillent entre 6,7 et 7,6 avec une moyenne de 7,1. La CE enregistre une valeur

minimale de 69,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ obtenue en juin et une valeur maximale de 91,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La moyenne obtenue est de 78,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et l'écart-type de 6,4. La moyenne, le minimum et le maximum de la turbidité sont respectivement de 10,2 NTU ; 5,19 NTU et 15,35 NTU avec un écart-type de 4,1. Les teneurs en MES oscillent entre 4,41 mg/L et 18,31 mg/L avec une moyenne de 10,4 mg/L et un écart-type de 4,8. Les écart-types montrent que la CE, la turbidité et les MES sont les paramètres qui fluctuent le plus d'un mois à un autre. En termes d'évolution, si la CE et la température semblent linéaires (**Figure 3**), les valeurs les plus élevées sont obtenues en saison sèche et les plus faibles en saison pluvieuse. Les courbes de la turbidité et des MES épousent presque parfaitement celle des débits.

Tableau 1 : Statistiques des paramètres mesurés in situ et de MES

| | T°C | PH | CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | Turb (NTU) | MES (mg/L) |
|------------------------|------|----------------|--------------------------------|------------|------------|
| Minimum | 26,4 | 6,7 | 69,8 | 5,19 | 4,41 |
| Maximum | 30,6 | 7,6 | 91,5 | 15,35 | 18,31 |
| Moyenne | 28,3 | 7,1 | 78,5 | 10,2 | 10,4 |
| Écart-type | 1,5 | 0,2 | 6,4 | 4,1 | 4,8 |
| Normes OMS (2017) [25] | - | 6,5 < pH < 8,5 | < 400 | 5 | 15 |

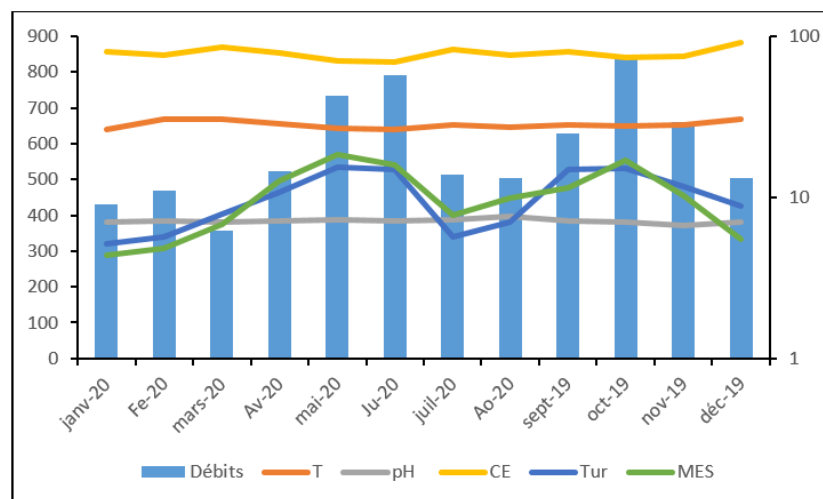


Figure 3 : Évolution des paramètres in situ de septembre 2019 à août 2020 à la station de Gaoulou

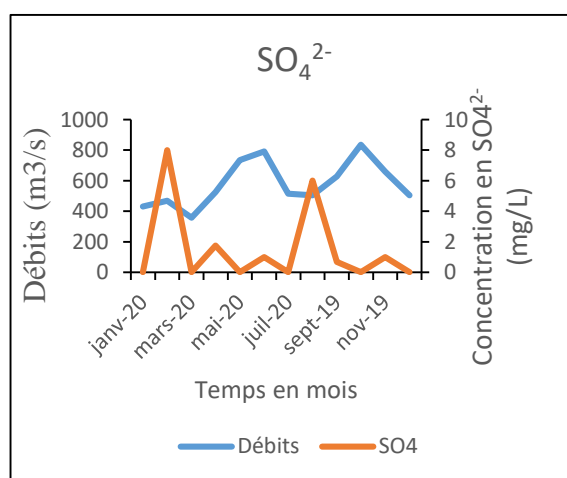
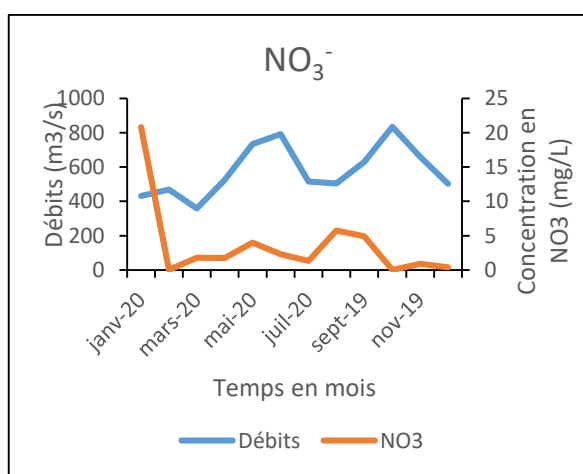
3-2. Éléments majeurs dans les eaux du Sassandra

Le **Tableau 2** montre les statistiques élémentaires des cations et anions majeurs ainsi que la silice dans les eaux du Sassandra. Au niveau des anions, les nitrates (NO_3^-) et les sulfates (SO_4^{2-}) enregistrent des minimums nuls et des maximums respectifs de 20,8 mg/L et 8 mg/L avec des moyennes de 3,66 mg/L et 1,54 mg/L. Les concentrations en chlorures (Cl^-) varient de 1,6 mg/L à 18 mg/L avec une moyenne de 5,55 mg/L. Les bicarbonates (HCO_3^-) enregistrent les fortes concentrations dans les eaux du Sassandra à Gaoulou avec des valeurs allant de 25,8 mg/L à 34,16 mg/L et une moyenne de 29,48 mg/L. concernant les cations, le plus dominant est le calcium (Ca^{2+}) avec une moyenne de 5,46 mg/L et des minimum et maximum respectifs de 3,83 mg/L et 9,936 mg/L. Vient ensuite le sodium (Na^+) avec des valeurs qui vont de 1,772 mg/L à 8,26 mg/L et une moyenne de 4,19 mg/L. Les concentrations en potassium (K^+) ont une moyenne de 2,24 mg/L, un minimum de 1,05 mg/L et un maximum de 3,754 mg/L. Le cation le moins abondant est le magnésium (Mg^{2+}) avec une moyenne de 1,67 mg/L, un minimum de 0,842 mg/L et un maximum de 2,709 mg/L. La silice (SiO_2) est le deuxième élément le plus abondant dans les eaux du Sassandra avec une moyenne de 19,07 mg/L.

Tableau 2 : Statistiques des éléments majeurs dans les eaux du Sassandra à Gaoulou

| | NO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | HCO ₃ ⁻ | Mg ²⁺ | K ⁺ | Ca ²⁺ | Na ⁺ | SiO ₂ |
|---------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|------------------|----------------|------------------|-----------------|------------------|
| Minimum | 0 | 0 | 1,6 | 25,8 | 0,842 | 1,05 | 3,83 | 1,772 | 9,9 |
| Maximum | 20,8 | 8 | 18 | 34,16 | 2,709 | 3,754 | 9,936 | 8,26 | 30,9 |
| Moyenne | 3,66 | 1,54 | 5,55 | 29,48 | 1,67 | 2,24 | 5,46 | 4,19 | 19,07 |
| Écart type | 5,72 | 2,65 | 5,54 | 2,62 | 0,65 | 0,81 | 2,42 | 1,91 | 5,30 |
| Normes OMS 2017[25] | 50 | 250 | 200 | - | - | - | - | - | - |

Les **Figures 4 et 5** montrent l'évolution des éléments majeurs en fonction des débits de septembre 2019 à août 2020. La **Figure 4** montre que les concentrations en chlorures (Cl⁻) semblent suivre la décrue. Les deux valeurs les plus élevées (18 mg/L en août et 16 mg/L en février) sont obtenues respectivement lors de la petite décrue et en grande décrue. Mais à part ces deux mois, la relation entre les concentrations de Cl⁻ et les débits n'est pas bien perceptible. Les bicarbonates (HCO₃⁻) suivent clairement la décrue. Au cours des mois de décrue (décembre, janvier, février, mars et août), les teneurs en bicarbonates sont supérieures à 30 mg/L tandis que les mois de crue enregistrent des concentrations inférieures à 30 mg/L. L'évolution des teneurs en nitrates (NO₃⁻) et en sulfates (SO₄²⁻) est aléatoire. Pour ces deux paramètres des concentrations nulles sont obtenues aussi bien en période de crue qu'en période de décrue. Les concentrations en Mg²⁺, Na⁺ et K⁺ semblent croître avec la crue (**Figure 5**). En suivant l'évolution des courbes des débits et des concentrations en Mg²⁺, on constate une similitude en excluant les mois de février et mars. Néanmoins, il y a un décalage entre les pics des concentrations en Mg²⁺ et les pics des débits, ceux des concentrations en Mg²⁺ survenant avant les débits. De janvier à août les courbes des concentrations en Na⁺ et des débits s'épousent presque parfaitement. Les teneurs en Na⁺ atteignent leur maximum en septembre (3,754 mg/L) avant de décroître alors que le pic des débits est atteint en octobre (835,2 m³/s). Les concentrations de Ca²⁺ semblent évoluer avec la décrue. Tandis que les débits croissent de janvier à juin, la tendance est contraire pour les teneurs en Ca²⁺. À partir de juin, la relation débit-concentration n'est pas claire car le mois d'août qui enregistre un débit de 504 m³/s à la concentration la plus faible en Ca²⁺ (3,83 mg/L) et le mois de novembre avec un débit plus important (659,6 mg/L) enregistre une concentration de (9,62 mg/L) supérieure à celle d'août. Les concentrations en SiO₂ évoluent clairement avec la crue. En effet, la courbe des teneurs en SiO₂ épouse parfaitement l'évolution de celle des débits.



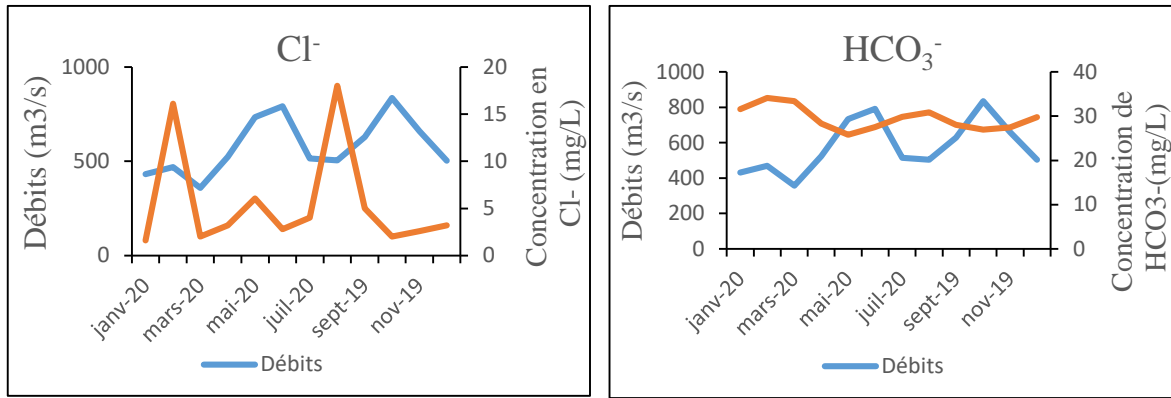
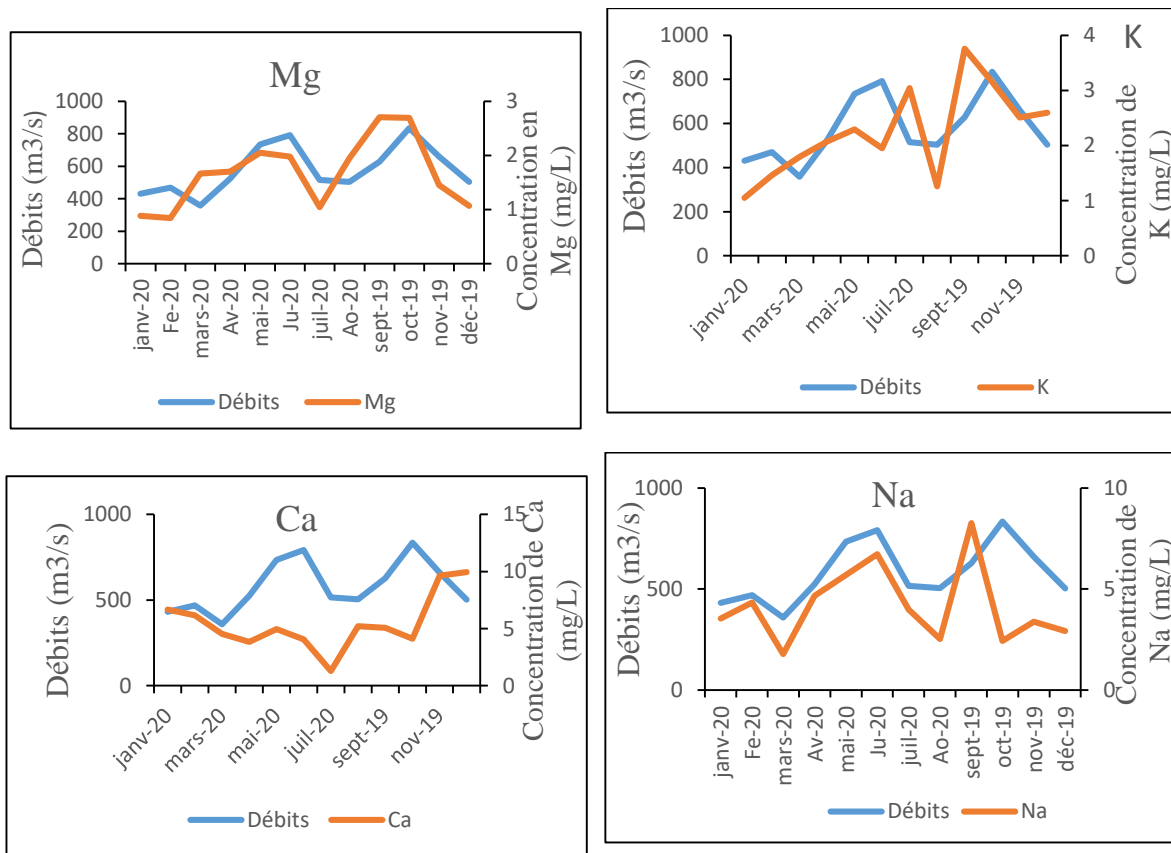


Figure 4 : Évolution des anions par rapport aux débits mensuels. Les valeurs de janvier à août appartiennent à 2020 et celles allant de septembre à décembre à l'année 2019



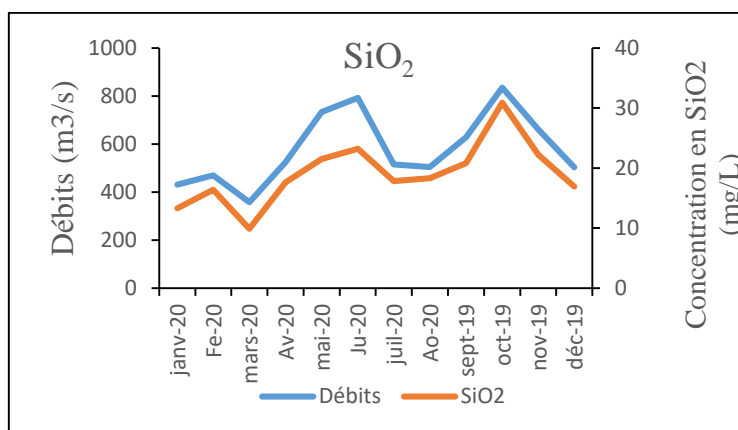


Figure 5 : Évolution des cations et de la silice par rapport aux débits. Les valeurs de janvier à août appartiennent à 2020 et celles allant de septembre à décembre à l'année 2019

3-3. Étude des éléments traces métalliques (ETM)

Les ETM ont été dosés de manière saisonnière (février, juillet, août et novembre). Le **Tableau 3** montre les statistiques des ETM dans les eaux du fleuve Sassandra à Gaoulou. Fe²⁺ est de loin l'ETM le plus abondant dans les eaux du Sassandra avec des concentrations allant de 152 µg/L à 950 µg/L avec une moyenne de 478 µg/L. Cu²⁺ a des concentrations très faibles avec une moyenne de 1,26 µg/L, un minimum de 0,43 µg/L et un maximum de 1,61 µg/L. Les teneurs en Cr²⁺ varient de 1,66 µg/L à 5,16 µg/L avec une moyenne de 2,70 µg/L. Le Pb²⁺ a des concentrations qui varient d'une valeur inférieure à 0,006 µg/L à 3,49 µg/L avec une moyenne de 1,06 µg/L. Enfin, Hg²⁺ a des concentrations qui varient entre 0,80 µg/L à 2,05 µg/L et une moyenne de 1,44 µg/L.

Tableau 3 : Statistiques élémentaires des ETM à la station hydrométrique de Gaoulou

| | Fe ²⁺ (µg/L) | Cu ²⁺ (µg/L) | Cr ²⁺ (µg/L) | Pb ²⁺ (µg/L) | Hg ²⁺ (µg/L) |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Minimum | 152 | 0,434 | 1,663 | <0,006 | 0,803 |
| Maximum | 950 | 1,609 | 5,157 | 3,49 | 2,047 |
| Moyenne | 478 | 1,263 | 2,705 | 1,062 | 1,444 |
| Écart-type | 336,7 | 0,6 | 1,6 | 1,6 | 0,7 |
| Normes OMS (2017) [25] | 300 | 2000 | 50 | 10 | 6 |

La **Figure 6** présente l'évolution des ETM en fonction des débits pendant les quatre mois étudiés. Les concentrations en Fe²⁺ semblent suivre la crue. Pour ce paramètre, les valeurs obtenues en saison pluvieuse (juillet : 950 µg/L et novembre : 420 µg/L) sont plus élevées que celles obtenues en saison sèche (février : 150 µg/L et août : 390 µg/L). Les autres ETM ont une évolution qui semble aléatoire. Hormis, la concentration de Cu²⁺ du mois d'août qui est inférieure à 1 µg/L, les trois autres sont homogènes et se situent autour de 1,5 µg/L. Malgré la variation de débit entre le mois de février (469,4 m³/s) et celui de juillet (515 m³/s) puis de novembre (659,6 m³/s), les concentrations sont identiques en février et juillet (1,505 µg/L) et varient peu en novembre (1,609 µg/L). Pour Cr²⁺, le mois de juillet qui enregistre la deuxième valeur de débit la plus élevée a la plus forte concentration (5,157 µg/L) et le mois de février dont le débit est le plus faible, enregistre la deuxième teneur la plus élevée (2,177 µg/L). La concentration minimale et la concentration maximale en Pb²⁺ sont obtenues en saison sèche (février : <0,006 µg/L et août : 3,49 µg/L). Enfin, les concentrations en Hg²⁺ dont l'ordre de décroissance est novembre > février > juillet > août ne permettent pas de montrer l'influence des débits sur leur évolution.

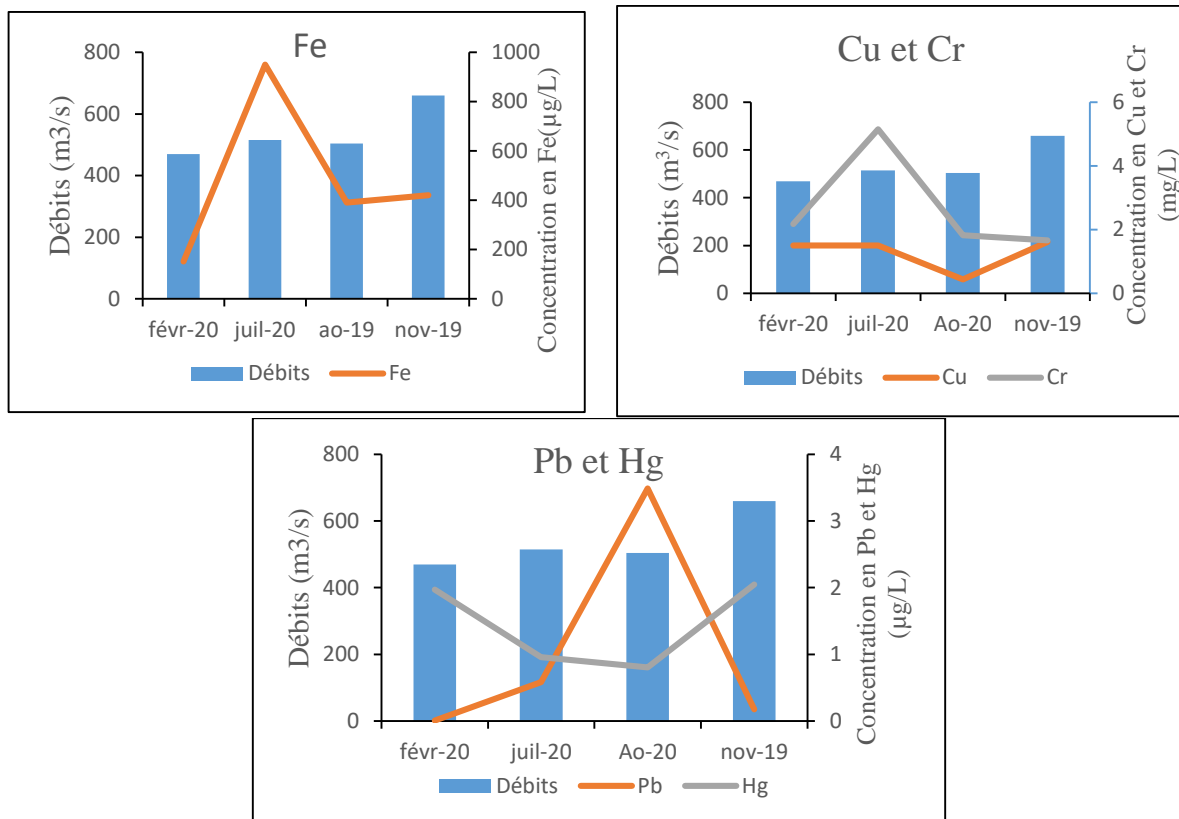


Figure 6 : Évolution des ETM par rapport aux débits

4. Discussion

4-1. Paramètres *in situ* et MES

La température de l'eau agit sur la densité, la viscosité, la solubilité des gaz dans l'eau, la dissociation des sels dissous, de même que sur les réactions chimiques et biochimiques [21]. La température des eaux du Sassandra à Gaoulou enregistre une moyenne de 28,3°C. De telles valeurs de température, ($T > 15^{\circ}\text{C}$) favorisent la croissance des microorganismes et le développement de nuisances, posant ainsi des problèmes de goût, de couleur de l'eau et d'odeur [25]. En 2017, l'OMS n'a pas défini une valeur guide pour ce paramètre [25]. La température des eaux de surface est influencée par celle de l'atmosphère ce qui explique leur similitude [26]. En Afrique de l'Ouest, les valeurs moyennes de températures sont de 30°C, donc les valeurs obtenues lors de cette étude sont normales. La moyenne du pH est de 7,1. Ces résultats sont proches de ceux enregistrés sur le Bandama à Tiassalé (moyenne : 7,56) [27]. Ces grands fleuves, du fait de l'importance de leur bassin, versant traversent différentes zones climatiques et végétations et coulent sur des substrats rocheux divers. La moyenne de pH enregistrée est supérieure à celles observées dans les cours d'eaux côtiers Mé (6,48) et Agneby (6,65), plus circonscrits dans le sud forestier [27]. Bien que le pH n'ait pas habituellement un impact direct sur les consommateurs, c'est un des paramètres opérationnels les plus importants de la qualité de l'eau [25]. Il faut donc veiller attentivement à réguler le pH à tous les stades de traitement de l'eau pour garantir une clarification et une désinfection satisfaisante de l'eau. La conductivité électrique traduit le degré de minéralisation globale, elle nous renseigne sur le taux de salinité [28]. La moyenne de la CE au cours de notre étude est de 78,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, situant les eaux du Sassandra dans la classe des eaux faiblement minéralisées. Cette minéralisation est légèrement inférieure à la moyenne de 96 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sur le Bandama à

Tiassalé [27] ; $96,1 \mu\text{S}/\text{cm}$ sur le N'zi [13] et $110 \mu\text{S}/\text{cm}$ dans les eaux de la rivière Davo [29]. La CE est plus élevée en saison sèche qu'en saison pluvieuse. On pourrait penser à un phénomène de dilution du fleuve, due à la pluviométrie. Du fait de sa proximité avec la mer (15 km), on pourrait aussi penser à des remontées marines se traduisant par une forte salinité. Cependant, à cause du fort dénivelé du fleuve (côte de 9,78 m) [30], les intrusions marines ne se font sentir qu'à peine 5 km de l'embouchure. Les moyennes des MES et de la turbidité sont respectivement de 10,4 mg/L et 10,2 NTU. La moyenne des MES est inférieure à celle de 2003 (15,59 mg/L) obtenue à la même station [31]. Cette différence est due à la mise en service du barrage de Soubré en 2017. Les valeurs des matières en suspension et de la turbidité en période de crue sont élevées par rapport à celles de la période d'étiage. Ceci est dû à des pluies abondantes qui entraînent une très forte érosion des terrains au voisinage du fleuve Sassandra (lessivage des sols). Les valeurs obtenues pour la turbidité sont toutes supérieures à la valeur guide fixée par l'OMS en 2017 [25] (5 NTU). Ces valeurs situent les eaux du Sassandra dans la classe des eaux légèrement troubles ($5 < \text{Tur} < 30$ NTU). La turbidité et les MES sont généralement issues du couvert végétal, des pratiques agricoles, des rejets industriels, des ruissellements urbains, de l'érosion des berges, etc [32]. Les turbidités élevées jouent non seulement sur l'aspect physique de l'eau mais aussi sur l'aspect chimique. En effet, les particules en suspension sont des vecteurs de micropolluants minéraux (métaux lourds) et organiques (HAP, pesticides) et servent de biofilm pour les microorganismes et toxines qui peuvent nuire à la désinfection de l'eau [33]. Le traitement des eaux de rivières destinées à l'Adduction en Eau Potable (AEP) ayant une forte turbidité, coûte très cher à cause des nombreuses techniques (floculation avec agent chimiques, filtration simple ou membranaire) utilisées pour atteindre la norme de 1-5 NTU préconisée après traitement par l'OMS (2017) [25]

4-2. Éléments majeurs

Dans l'ensemble, les eaux du fleuve Sassandra ont un faciès bicarbonaté calcique en saison sèche et bicarbonaté sodique en saison pluvieuse et les concentrations en éléments majeurs sont largement inférieures aux normes de l'OMS (2017) [25]. La faiblesse des concentrations en éléments majeurs dénote d'une bonne qualité de l'eau vis-à-vis de ces éléments. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus en 2003 [31] à la même station de Gaoulou. Les teneurs en HCO_3^- augmentent clairement avec la décrue, à cause du mélange des eaux du fleuve avec celles des eaux de pluies pauvres en bicarbonates [34]. Le fait que Cl^- évolue avec la décrue montre qu'il provient du substratum rocheux avec la restitution des eaux des nappes en période de décrue. Les nitrates sont à surveiller dans les eaux de boisson pour assurer une protection contre la méthémoglobinémie et les effets thyroïdiens dans la sous-population la plus sensible, les nouveau-nés nourris au biberon [25]. Lorsque les teneurs en Cl^- dépassent 200 mg/L, celles-ci donnent un goût indésirable à l'eau [25]. En 1976 ; le cation dominant dans les eaux de la Brimay, le Néro, le San Pédro et le Sassandra à Gaoulou avec une valeur maximale de 9 mg/L était Na^+ [35]. Dans notre étude, le cation dominant est le Ca^{2+} avec une moyenne de 5,46 mg/L et une valeur maximale de 9,94 mg/L. Cependant, comme dans l'étude de 1976 [35], le Na^+ a une concentration maximale de 8,26 mg/L proche de 9 mg/L. Les teneurs en Ca^{2+} croissent avec la décrue comme l'a décrit Molinier (1976) [35]. Par contre, les concentrations en Mg^{2+} , Na^+ et K^+ croissent avec la crue. Ces trois éléments en plus des apports du substratum ont une origine superficielle. Cette évolution du Mg^{2+} , Na^+ et K^+ serait influencée par les apports provenant de des travaux de construction des barrages de Soubré et Gribo-Popoli. La silice est abondante dans les eaux du Sassandra et les concentrations suivent la crue avec une moyenne de 19,07 mg/L. La silice provient de l'hydrolyse totale des silicates, qui après sa libération dans l'eau a tendance à se dissoudre pour être transporté par les eaux de drainages. Ceci explique les fortes concentrations observées dans cette étude par rapport à celles de 2003 [31] dont la moyenne est de 16,26 mg/L.

4-3. Cas des ETM

Pour le traitement des eaux du Sassandra, la Société de Distribution d'eau de Côte d'Ivoire (SODECI) surveille le fer (Fe^{2+}) et l'aluminium (Al^{3+}). Dans notre étude nous avons pris en compte en plus du Fe^{2+} , le Hg^{2+} , le Pb^{2+} , le Cr^{2+} et le Cu^{2+} . Les moyennes de ces quatre paramètres sont respectivement de 478 $\mu\text{g/L}$; 1,44 $\mu\text{g/L}$; 1,06 $\mu\text{g/L}$; 2,70 $\mu\text{g/L}$ et 1,26 $\mu\text{g/L}$. Nous avons dosé Hg^{2+} et Pb^{2+} à cause de leur dangerosité pour les consommateurs. Par ailleurs, l'orpaillage clandestin qui se pratique dans presque toutes les régions de Côte d'Ivoire amène à surveiller les concentrations en Hg^{2+} dans les eaux de consommations. Des concentrations similaires ont été relevées dans les eaux de la rivière Davo [29] avec des moyennes de 210,25 $\mu\text{g/L}$ pour Fe^{2+} ; 1,403 $\mu\text{g/L}$ pour Hg^{2+} ; 1,56 $\mu\text{g/L}$ pour Pb^{2+} ; 2,73 $\mu\text{g/L}$ pour Cr^{2+} et 4,517 $\mu\text{g/L}$ pour Cu^{2+} . Parmi les ETM étudiés, le Fe^{2+} est l'élément dont les concentrations dépassent la valeur guide de l'OMS (2017) [25]. Les teneurs élevées en fer sont une caractéristique des eaux naturelles de la Côte d'Ivoire. Les sols de la zone d'étude sont dominés par les sols ferrallitiques et les sols ferrugineux. Au cours du processus d'altération, les sesquioxides Fe_2O_3 s'accumulent en surface par migration ascendante [35]. Ces éléments sont ensuite transportés par les eaux de ruissellement. Par ailleurs, les concentrations en Fe^{2+} semblent évoluer avec la crue. Les concentrations élevées en Fe^{2+} ne constituent pas un danger pour la santé humaine mais donne un goût métallique à l'eau au-delà de 300 $\mu\text{g/L}$ et cause des problèmes esthétiques [25]. Les effets toxiques des composés de mercure inorganique sont principalement observés au niveau des reins chez l'homme après une exposition à court terme et à long terme. Ces troubles s'observent quand les concentrations dans l'eau de boisson sont supérieures à 6 $\mu\text{g/L}$ [25]. La valeur guide pour le cuivre (2000 $\mu\text{g/L}$) [25] est également fondée sur une exposition à court terme mais elle a pour but de protéger contre l'irritation gastrique directe qui est un phénomène dépendant de la concentration. L'exposition au plomb entraîne de nombreux effets, notamment divers effets neuro-développementaux, la mortalité (principalement due à des maladies cardiovasculaires), des troubles de la fonction rénale, l'hypertension, des troubles de la fertilité et des issues défavorables de la grossesse. Ces effets s'observent à des concentrations supérieures à 10 $\mu\text{g/L}$ [25].

5. Conclusion

Cette étude vise un suivi de la qualité physico-chimique des eaux brutes du Sassandra à Gaoulou lieu de pompage de l'eau destinée à la consommation de la ville de Sassandra. Les moyennes de la température, du pH, de CE des MES et de la turbidité sont respectivement de 28,3 °C; 7,1; 78,5 $\mu\text{S/cm}$; 10,2 NTU et 10,4 mg/L. Les cations majeurs (Mg^{2+} , K^+ , Ca^{2+} et Na^+) et les anions tels que NO_3^- , SO_4^{2-} et Cl^- ont des concentrations très faibles par rapport aux normes internationales. HCO_3^- et SiO_2 ont des moyennes respectives de 29,48 mg/L et 19,07 mg/L. Concernant les ETM dosés, les moyennes sont 478 $\mu\text{g/L}$; 1,263 $\mu\text{g/L}$; 2,705 $\mu\text{g/L}$; 1,062 $\mu\text{g/L}$ et 1,444 $\mu\text{g/L}$ respectivement pour Fe^{2+} ; Cu^{2+} ; Cr^{2+} ; Pb^{2+} et Hg^{2+} . Au vu de ces résultats, le traitement de l'eau du Sassandra doit tenir compte de la turbidité dont les valeurs sont élevées pendant la crue du Sassandra. Aussi le traitement doit tenir compte des ETM surtout Fe^{2+} dont les concentrations relevées sont souvent supérieures aux normes internationales. Des analyses complémentaires sur les pesticides et la microbiologie pourraient compléter cette étude.

Références

- [1] - UNESCO, « ODD6 - Garantir l'accès de tous à l'eau et à l'assainissement et assurer une gestion durable des ressources en eau », Disponible sur Agenda-230.fr
- [2] - D. BAKA, T. P. TAKPA et K. E. KOUADIO, « Caractérisation des aquifères productifs dans la région de Man, Ouest de la Côte d'Ivoire », *Afrique SCIENCE*, 18 (4) (2021) 96 - 109
- [3] - M. OUEDRAOGO, « Caractérisation des aquifères de socle pour l'amélioration de la productivité des forages d'hydraulique villageoise dans le bassin versant du Bandama blanc amont (Nord de la Côte d'Ivoire) », Géophysique [physics.geo-ph]. Université Paris Saclay, (2016) 242 p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02100659v2>
- [4] - Ministère de l'Hydraulique, « projets réalisés de 2011 à 2019 », Online, consulté le 24 août 2022 : http://hydraulique.gouv.ci/?controller=article&action=liste_article_only&idCat=18
- [5] - O. A. ADJIRI, N. AKA, T. S. SORO, D. KONATE et N. SORO, « Caractérisation des ressources en eaux alternatives de la ville de Daloa : impacts sur la santé et implications dans le développement régional », TSM, N° 12 (2018) 89 - 112
- [6] - L. O. BLE, G. S. DEGRY, A. DOUAMPO et T. D. SORO, « Qualité physico-chimique des eaux d'adduction publique issues d'une station de traitement d'Abidjan (cas de la station zone Nord d'Adjamé) ». *Afrique SCIENCE*, 18 (2) (2021) 81 - 93
- [7] - K. T. YAO, O. FOUCHÉ, M-S. OGA, G. FERRIERE and D. BAKA, «A new concept for hard rock aquifers survey and management : individual blocks approach», *Am. J. Sci. Ind. Res*, 3 (4) (2012) 208 - 220. doi:10.5251/ajsir.2012.3.4.208.220
- [8] - G. E. AKE, « Impacts de la variabilité climatique et des pressions anthropiques sur les ressources hydriques de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) », Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody (Abidjan), Côte d'Ivoire, (2010) 234 p.
- [9] - G. SORO G, « Évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau souterraines dans la région des lacs (centre de la côte d'ivoire) : hydrogéologie et hydrochimie des aquifères discontinus du district de Yamoussoukro et du département de Tiebissou », Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody Abidjan Côte d'Ivoire, (2010) 290 p.
- [10] - D. BAKA, K. E. KOUADIO, K. T. YAO et T. P. TAKPA, « Potentiel de productivité des aquifères de la région de Man (Côte d'Ivoire) par la méthode de krigeage », *EWASH & TI Journal*, Vol. 5, Issue 2 (2021) 597 - 604. En ligne : <http://revues.imist.ma/?journal=ewash-ti/>
- [11] - Institut National de la statistique (INS), « Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGHP), résultats globaux, Côte d'Ivoire, (2014) 49 p. https://www.ins.ciRGPH2014_expo_dr
- [12] - Portail Officiel du Gouvernement de Côte d'Ivoire, « Résultats globaux du RGPH 2021 », Disponible sur : https://www.gouv.ci/_actualite-article.php?recordID=13769 , consulté le 24 août 2022
- [13] - E. K. AHOUSI, B. Y. KOFFI, M. A. KOUASSI, M. G. SORO, N. SORO et J. BIEMI, « 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) », *Int. J. Biol. Chem. Sci*, Vol. 6, (2012) 1854 - 1873
- [14] - A. TRAORE, « Impacts des changements climatiques et du changement de l'occupation et de l'utilisation du sol sur les ressources en eau de l'environnement lagunaire d'aghien et de potou (Sud-Est de la côte d'ivoire) », Thèse de Doctorat de l'Université Félix Houphouët Boigny de Cocody (Abidjan), Côte d'Ivoire, (2016) 249 p.
- [15] - P. TOHOURI, M. G. SORO, E. K. AHOUSI, G. M. ADJA, G. E. AKÉ et J. BIÉMI, « Pollution par les éléments traces métalliques des eaux de surface en période de hautes eaux de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) », *Larhyss Journal*, N°29 (2017) 23 - 43

- [16] - G. S. EBLIN, P. A. SOMBO A P, N. AKA, O. KAMBIÉ et N. SORO, « Hydrochimie des eaux de surface de la région d'Adiaké (Sud-est côtier de la Côte d'Ivoire) », *Journal of Applied Biosciences*, Vol. 75, (2014) 6259 - 6271. Doi : 10.4314/jab.v75i1.10
- [17] - K. N. D. ATCHEREMI, « Effet du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant de la rivière Davo (sud-ouest de la côte d'ivoire) et analyse des mesures endogènes d'adaptation : apport de la modélisation hydrologique avec le logiciel hydrotel », Thèse de Doctorat Université Félix Houphouët Boigny de Cocody- Abidjan, (2019) 231 p.
- [18] - J. CAMIL, « Pétrographie, chronologie, des ensembles granulitiques archéens et formations associées de la région de Man (Côte d'Ivoire). Implication pour l'histoire géologique du craton ouest-africain » Thèse d'État, université d'Abidjan, (1984)
- [19] - A. N. KOUAMELAN, « Géochronologie et géochimie des formations archéennes et protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition archéenprotérozoïque. Thèse de Doctorat. Université de Rennes 1. Rennes (France), (1996) 277 p.
- [20] - A. PAPON et R. LEMARCHAND, « Géologie et minéralisation du sud-ouest de la Côte d'Ivoire. Synthèse des travaux de l'opération SASCA (1962-1968). SODEMI, Abidjan, (1973) 284 p.
- [21] - Le RODIER, « L'analyse de l'eau, 9eme Edition », (2009) 1579 p. https://www.researchgate.net/publication/311638413_L'analyse_de_l'eau_Controlé_et_interpr
- [22] - A. MARECHAL, « Relations entre caractéristiques de la pollution particulaire et paramètres optiques dans les eaux résiduaires urbaines », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Génie des Procédés, Nancy, (2000) 284 p.
- [23] - A. BLUM, O. ROUZEAU & A. GUIRAUD, « Suivi de la turbidité des eaux de Guyane. État des lieux et recommandations/ Approche par télédétection, Rapport BRGM/RP-616326FR, (2014) 162 p. <https://side.developpement-durable.gouv.fr/Default/doc/SYRACUSE/342494/suivi-de-la-turbidite-des-eaux-de-guyane-etat-des-lieux-et-recommandations-approche-par-teledelectio>
- [24] - NF EN ISO 7027, « Qualité de l'eau - Détermination de la turbidité », Afnor, Paris (France), (2000) 14 p.
- [25] - OMS, « Directives de qualité pour l'eau de boisson : 4ème éd. Intégrant le premier additif [Guidelines for drinking-water quality : 4th ed. incorporating first addendum]. Genève : Organisation mondiale de la Santé. Licence : CC BY-NC-SA 3.0 IGO, (2017) 564 p.
- [26] - N. SORO, « Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du Sud-Est de la Côte d'Ivoire : bassin versant de la Mé, Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle, Université Scientifique, Technologique et médicale de Grenoble, France, (1987) 213 p.
- [27] - N. AKA, L. A. KOUAMÉ, B. S. BAMBA et J. ABE, « Caractérisation saisonnière des paramètres physico-chimiques des eaux du Bandama, de l'Agneby et de la Mé (Côte d'Ivoire) » *F. Tech & Doc Vul*, 2 (2019) 24 - 31
- [28] - A. D. N'DIAYE, M. M. S. KHADIJETTOU et O. S. O. K MOHAMED, « Contribution à l'étude de la qualité physicochimique de l'eau de la rive droite du fleuve Sénégal », *Larhyss Journal*, N°12 (2013) 71 - 83. <http://larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/article/view/148>
- [29] - N. AKA, Y. D. A. GBOKO, K. N. KEUMEAN, O. A. ADJIRI AND N. SORO, « Monitoring the Physico-Chemical Quality of the Davo River (South-West of Cote d'Ivoire) », *Open Journal of Applied Sciences*, 12 (2022) 1402 - 1415. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2022.128097>
- [30] - Annuaire hydrologique de Côte d'Ivoire (HACI), « caractéristiques hydrologiques », Tome 1 ; Ministère des travaux publics, (1974) 91 p.
- [31] - L. AGBRI, B. S. BAMBA, I. DOUMOUYA et I. SAVANE I, « Bilan des flux de matières particulaires et dissoutes du Sassandra à Gaoulou pont (Côte d'Ivoire) », *Sciences & Nature*, Vol. 7, N°2 (2010) 107 - 118. DOI : 10.4314/scinat.v7i2.59944

- [32] - N. AKA, A. L. KOAME & Y. D. A. GBOKO, « Suivi de la turbidité et des matières en suspension dans une rivière côtière : la Mé (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) » *F. Tech & Doc Vul.*, 2 (2020) 30 - 37
- [33] - P. A. VERSINI, C. JOANNIS et G. CHEBBO, « Guide technique sur le mesurage de la turbidité dans les réseaux d'assainissements » ONEMA, (2015) 82 p. [https : hal-01467389](https://hal-01467389)
- [34] - BRGM, « Bilan de l'érosion chimique et mécanique dans un bassin forestier en milieu tropical humide prospect aurifère de Yaou, Guyane Française », (1994) 155 p.
- [35] - M. MOLINER, « Qualité des eaux de surface en zone forestière équatoriale de Côte d'Ivoire », *ORSTOM. Ser. Hydrol*, Vol. 13, N°1 (1976) 7 - 35