

SOMMAIRE

DEDICACES	<u>VI</u>
REMERCIEMENTS.....	<u>VII</u>
RESUME.....	<u>XI</u>
ABSTRACT	<u>XII</u>
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 : PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D’ETUDE	4
CHAPITRE 2 : CONTEXTE GEOLOGIQUE, HYDROLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DE LA ZONE D’ETUDE	15
CHAPITRE 3 : MATERIEL ET METHODES	25
CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION	34
CONCLUSION GENERALE	69
PERSPECTIVES.....	70
BIBLIOGRAPHIE	71
ANNEXES.....	75

Listes des figures

Figure 1 : Carte de localisation du permis Kanoumba	4
Figure 2 : Moyennes mensuelles de la pluviométrie à Kédougou de 1989 à 2018	5
Figure 3 : Moyennes mensuelles des minima, moyennes et maxima de la température à Kédougou de 1989 à 2018	6
Figure 4 : Evolution des écarts à la moyenne annuelle de la pluviométrie à Kédougou de 1989 à 2018	7
Figure 5 : Moyennes mensuelles de l'évaporation à Kédougou de 1989 à 2018.....	8
Figure 6 : Carte de répartition des altitudes dans le permis Kanoumba (extrait des images Alos Palsar 12.5 m de résolution).....	9
Figure 7 : Carte de répartition des pentes dans le permis Kanoumba (extrait des images Alos Palsar de 12.5 m de résolution).....	10
Figure 8 : Ensembles litho-structuraux du craton ouest africain (Black, 1980) (modifiée)	15
Figure 9 : Carte de la Boutonnière de Kédougou Kéniéba (Base de données RRL, 2019).....	17
– Figure 10 : Carte du réseau hydrographique dans notre zone d'étude	20
Figure 11 : Modèle de réservoir bicouche en domaine de socle (Lachassagne et Wyns, 2005)	23
Figure 12 : Carte de localisation des sites de prélèvement dans le permis Kanoumba	27
Figure 13 : Valeurs de pH des eaux souterraines échantillonnées	34
Figure 14 : Valeurs de CE des eaux souterraines échantillonnées	35
Figure 15 : Valeurs turbidité des eaux souterraines échantillonnées.....	36
Figure 16 : Répartition des faciès chimiques des eaux sur diagramme de Piper (Campagne Avril 2018)	39
Figure 17 : Répartition des faciès chimiques des eaux sur diagramme de Piper (Campagne Août 2018)	39
Figure 18 : Concentrations en mg/L des eaux souterraines en ions majeurs dans le permis Kanoumba	40
Figure 19 : Concentrations en Ca^{++} des eaux souterraines échantillonnées	41
Figure 20 : Concentrations en Cl^- des eaux souterraines échantillonnées	42
Figure 21 : Concentrations en Mg^{++} des eaux souterraines échantillonnées	42
Figure 22 : Concentrations en Na^+ des eaux souterraines échantillonnées.....	43
Figure 23 : Concentrations en K^+ des eaux souterraines échantillonnées	44
Figure 24 : Concentrations en HCO_3^- des eaux souterraines échantillonnées	44
Figure 25 : Concentrations en NO_3^- dans les eaux souterraines échantillonnées	45
Figure 26 : Concentrations en SO_4^- des eaux souterraines échantillonnées.....	47
Figure 27 : Concentrations en $\mu\text{g/L}$ des eaux souterraines en ETM dans le permis Kanoumba.....	48
Figure 28 : Concentrations en Al des eaux souterraines échantillonnées.....	49
Figure 29 : Concentrations en Sb des eaux souterraines échantillonnées	49
Figure 30 : Concentrations en As des eaux souterraines échantillonnées	50
Figure 31 : Concentrations en Cr des eaux souterraines échantillonnées.....	52
Figure 32 : Concentrations en Cu des eaux souterraines échantillonnées	52
Figure 33 : Concentrations en Fe des eaux souterraines échantillonnées.....	53
Figure 34 : Concentrations en Hg des eaux souterraines échantillonnées.....	54
Figure 35 : Concentrations en Pb des eaux souterraines échantillonnées	56
Figure 36 : Concentrations en Zn des eaux souterraines échantillonnées	57
Figure 37 : Valeurs de pH des eaux de surface échantillonnées	58

Figure 38 : Valeurs de CE des eaux de surface échantillonnées	59
Figure 39 : Valeurs de turbidité des eaux de surface échantillonnées.....	59
Figure 40 : Concentrations en NO ₃ ⁻ des eaux de surface échantillonnées.....	60
Figure 41 : Concentrations en Al des eaux de surface échantillonnées.....	62
Figure 42 : Concentrations en Sb dans les eaux de surface échantillonnées	62
Figure 43 : Concentrations en As des eaux de surface échantillonnées	63
Figure 44 : Concentrations en Cr des eaux de surface échantillonnées.....	64
Figure 45 : Concentrations en Cu des eaux de surface échantillonnées	64
Figure 46 : Concentrations en Fer des eaux de surface échantillonnées	65
Figure 47 : Concentrations en Hg des eaux de surface échantillonnées.....	66
Figure 48 : Concentrations en Pb des eaux de surface échantillonnées	67
Figure 49 : Concentrations en Zn des eaux de surface échantillonnées	68

Liste des photos

Photo 1 : vu du fleuve Gambie à Mako (Crédit photo : Base de données RRL, 2017).....	11
Photo 2 : végétation dense dans le permis Kanoumba (Crédit photo : DIOUF, 2018).....	12
Photo 3 : image de chimpanzés présents dans le permis Kanoumba (Crédit photo : base de données RRL 2018).....	13
Photos 4A, 4B, 4C et 4D : images de carottes illustrant les styles d'altération et de minéralisation qui existe dans la zone d'étude. Veine de quartz-stibine-Au avec altération séricite-carboné à proximité de la roche encaissante volcanoclastique et avec de la pyrite et de l'arsénopyrite disséminées dans la roche intrusive (4A), Or grossier visible associé aux veinules de stibine (4B), Roche silicifiée avec de la pyrite distale disséminée et en veinules avec de plus faibles quantités d'arsénopyrite (4C et 4D). (Rapport de faisabilité RRL, 2018).....	19
Photos 5A et 5B : aperçus saisonniers d'un affluent du Niokolo (X : 811372 Y : 1436352), Septembre 2016 (5A) et Mars 2017 (5B) (Crédit photo : Digby, 2018).....	21
Photos 6A, 6B, 6C et 6D : aperçus de l'échantillonnage des ouvrages hydrauliques, échantillonnage eaux de surface (6A), échantillonnage forage (6B), purgeage forage (6C) et purgeage piézomètre (6D) (Crédit photo : Diouf, 2018).....	29
Photos 7A et 7B : aperçus sur la préparation des échantillons, conditionnement des échantillons (7A), conservation des échantillons (7B) (Crédit photo : Diouf, 2018).....	30
Photos 8A et 8B : aperçus sur la turbidité des eaux de la rivière de Tinkoto, partie de la rivière située en amont des rejets miniers issus des activités d'orpaillage (8A), partie de la rivière située en aval des rejets miniers issus des activités d'orpaillage (8B) (Crédit photo : Diouf, 2018).....	37
Photos 9A, 9B, 9C et 9D : illustrent les potentielles sources de nitrate dans la zone d'étude, rejets eaux usées ménagères à Tinkoto (9A), dépotoir sauvage d'ordures à Tinkoto (9B), déjections animales autour du forage (9C) et champs d'arachide et de Maïs à kanouméring (9D) (Crédit photo : Diouf, 2018).....	46
Photos 10A et 10B : aperçus sur la turbidité des eaux de la rivière de Tinkoto, exploitation artisanale alluvionnaire dans la rivière (10A) et partie de la rivière située en aval de la zone d'exploitation artisanale alluvionnaire (10B) (Crédit photo : Diouf, 2018).....	60
Photos 11A et 11B : dépotoirs sauvages dans la zone d'étude, dépotoir d'ordure sauvage à l'entrée de Tinkoto (11 A) et dépotoir d'ordures sauvage près de la station MSW08 (11B) (Crédit photo : Diouf, 2018).....	61

Listes des tableaux

Tableau 1 : Chroniques d'écart pluviométrique sur la période 1989-2018.....	7
Tableau 2 : Coordonnées des points d'échantillonnage des eaux souterraines et de surface	75
Tableau 3 : Unité, limite de détection et méthode des analyses physico-chimiques et chimiques, réalisées sur les échantillons d'eau prélevés	76

DEDICACES

Proverbes 16 : 3 « Recommande à l'Éternel tes œuvres, Et tes projets réussiront. »

Je rends grâce au Seigneur le digne de reconnaissance, Gloire à Lui.

Je dédie ce modeste travail :

A mon père feu Alfonse DIOUF, pour le goût aux études et à l'effort qu'il a suscité en moi, de par sa rigueur. Que le Tout Puissant, l'accueil dans son Paradis.

A ma merveilleuse mère Anastance SAGNA qui m'a doté d'une éducation digne, son amour à fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

A ma marraine Marie Thérèse PREIRA, qui n'a ménagé aucun effort pour mes études ainsi que ma réussite.

A mes chères sœurs : Thérèse Suzanne DIOUF et Rose Khady DIOUF.

A mon grand-frère : Joseph Diouma DIOUF et à sa femme Agathe SENE dit Mme DIOUF.

A mon adorable neveu Alfonse Maurice DIOUF.

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer votre mérite. Je vous dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le Tout puissant, vous préserver et vous accorder santé, longévité bonheur et beaucoup d'argent.

REMERCIEMENTS

Un travail de cette envergure ne s'effectue pas en solitaire. Pour ne pas m'étendre sur cet avant-propos, il serait illusoire de penser pouvoir remercier, sans oublier, toutes les personnes qui ont contribué, consciemment ou non, à la réalisation de ce travail. Tous ces acteurs, même ceux dont le nom ne figure pas dans la suite parce que leur indispensable contribution est plus modeste, savent déjà à quel point je leur suis reconnaissant.

Je tiens à remercier l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail de recherche. D'abord, j'adresse ma sincère reconnaissance au **Professeur Bienvenu SAMBOU** qui malgré ses charges de Directeur de l'ISE me fait l'honneur de présider ce jury. Je remercie mon directeur de Mémoire, **Professeur Cheikh DIOP** pour avoir encadré ce travail avec beaucoup de rigueur. Sa disponibilité, ses observations et corrections ont abouti à la finalisation du présent mémoire.

Je remercie sincèrement mon maître, **Docteur Ibrahima MALL**, Hydrogéologue et cartographe d'avoir accepté d'être membre du jury en tant que rapporteur. Dr MALL s'est beaucoup investi dans le déroulement de cette recherche, faisant preuve d'une grande disponibilité et de beaucoup d'attention malgré ses multiples préoccupations. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde et sincère reconnaissance pour tout le temps qu'il a consacré à m'apporter les outils méthodologiques indispensables à la réalisation de ce travail mais également pour ses multiples relectures et ses précieuses corrections.

Je remercie infiniment **Dr El hadj Mamadou SONKO** de l'intérêt qu'il a porté à ce travail depuis le début et d'avoir accepté de faire partie de mon jury en qualité d'examineur. Ses conseils, ses encouragements et ses suggestions scientifiques m'ont toujours été utiles. Ces quelques mots ont bien du mal à exprimer l'estime et le respect que je lui porte ainsi que le plaisir et la chance que j'ai eu à travailler avec lui. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude. Je remercie également **Dr Assane GOUDIABY** qui a accepté de juger ce travail et pour avoir contribué à ma formation à l'ISE.

J'adresse ma sincère reconnaissance à **M. Babacar DIOUF** Responsable du service « Environnement-Santé-Sécurité » de Randgold pour avoir accepté de me prendre en stage et pour avoir été mon maître de stage à Massawa faisant preuve d'une grande ouverture et d'une grande confiance à mon égard. Malgré son calendrier chargé, il a toujours été disponible pour m'accorder un temps pour répondre à toutes mes interrogations. Son expertise m'a permis d'approfondir mon expérience professionnelle.

Merci au corps professoral de l'Institut des Sciences de l'Environnement particulièrement Pr Bienvenu SAMBOU Directeur de l'ISE, Pr Cheikh DIOP, Pr Henri LO, Pr

Cheikh I. NIANG, Pr Abou THIAM, Dr François MATTY, Dr Fatima Niang DIOP, Dr El hadj Mamadou SONKO, Dr Assane GOUDIABY, Dr Jean Birane GNING.

Si ce travail a pu se réaliser, c'est à coup sûr grâce à l'appui de Randgold Resources Ltd (RRL). Je tiens à remercier **M. Mohamed David MBAYE**, directeur pays de RRL qui m'a accueilli en stage dans son entreprise et permis de consolider mon expérience professionnelle et pour avoir mis à ma disposition tous les moyens logistiques et financiers me permettant de travailler dans de bonnes conditions. Veuillez retrouver à travers ce mémoire l'expression de mes sincères remerciements. J'associe à ces remerciements M. Léopold SENE administrateur du camp de Massawa.

Mention spéciale à mon doyen **Ibrahima BA** plus connu sous l'appellation BA GIS pour sa disponibilité sans faille et ses cours de cartographie qui m'ont été d'un grand apport et à **Séga DANFAKHA** qui a été mon guide sur le terrain et avec qui j'ai beaucoup appris.

J'exprime ma reconnaissance sincère à tout le personnel de RRL qui m'ont permis d'avoir un meilleur cadre d'intégration, d'apprentissage et une meilleure connaissance du permis Kanoumba.

Mention spéciale à toute l'équipe HSE en particuliers à M. DJILABODJI qui est à la fois un père et un encadrant pour moi, M Ousseynou DIOUME, M. Mamadou Moustapha DIALLO plus connu sous le nom de Major, M El Hadji FAYE. Merci pour votre accueil, le temps passé avec vous et pour l'expérience que vous avez partagée avec moi au quotidien.

J'adresse ma sincère reconnaissance à Serigne Ndiaga DIOP pour son appui et soutien.

J'adresse ma sincère reconnaissance à mon **Ami et Conseiller Mor DIOP**, pour ses conseils, son soutien, son humilité et son sens de partage. Très jeune certes, mais d'une batterie de sagesse. Merci de votre dynamisme dans l'accompagnement de ce travail.

Pour leurs encouragements et pour leur précieuse collaboration, je me dois de remercier chaleureusement tous mes camarades de la 39^{ème} promotion du Master Sciences de l'Environnement.

Un grand merci à mon ami Ousseynou DIAWARA pour son soutien et sa contribution.

J'adresse ma sincère reconnaissance à mes camarades de promotion du département de Géologie de l'UCAD particulièrement à Djim Mouhamadou Lamine DIONGUE, Mouhameth DIAW et à Ndiaye Wally Anoune DIAKHATE qui ont apporté une contribution sans faille dans la réalisation de ce travail.

Enfin, je remercie tous mes amis particulièrement, la famille 30 S de l'UCAD à savoir Mamadou Massamba DIOP, Bakary KEITA, Mohamed KONATE et Abdoulaye DIOUF qui m'ont toujours soutenu et encouragé durant la réalisation de ce travail.

LISTE DES ABREVIATIONS

AEP :	Approvisionnement en Eau Potable
Al :	Aluminium
ANACIM :	Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie
ANSD :	Agence National de la Statistique et de la Démographie
As :	Arsenic
BI :	Balance Ionique
BV :	Bassin Versant
Brr :	Barrick
BKK :	Bouttonnière de Kédougou-Kéniéba
CCME :	Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement
COA :	Craton Ouest-africain
Cr :	Chrome
CSE :	Centre de Suivi Ecologique
Cu :	Cuivre
DMA :	Drainage Minier Acide
EMAPE :	Extraction Minière Artisanale et à Petite Echelle
ESMGE :	Ecole Supérieure des Mines, de la Géologie et de l'Environnement
Etc :	et cætera
ETM :	Eléments Traces Métalliques
Fe :	Fer
FEPS :	Fondation de l'Eau Potable Sûre
FSM :	Faille Sénégal-Malienne
FST :	Faculté des Sciences et Techniques
Ga :	Milliard d'années
GPS :	Global Position System
g/t :	gramme par tonne
Hg :	Mercure
INERIS :	Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
ISE :	Institut des Sciences de l'Environnement
IST :	Institut des Sciences de la Terre
m :	Mètre
Ma :	Millions d'années

MTZ :	Main Transcurrent Zone
MNT :	Modèle Numérique de Terrain
NE :	Neutralité Électrique
NW :	Nord-Ouest
ODD :	Objectifs de Développement Durable
OMD :	Objectifs du Millénaire pour le Développement
OMS :	Organisation Mondiale de la Santé
PASMI :	Programme d'appui au Secteur Minier
Pb :	Plomb
RDC :	République Démocratique du Congo
RRL :	Randgold Resources Limited
Sb :	Antimoine
SGS :	Société Générale de Surveillance
UAM :	Université Amadou Mahtar Mbow
UCAD :	Université Cheikh Anta Diop de Dakar
UNESCO :	Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture
GPS :	Global Positioning System
$\mu\text{S}/\text{cm}$:	Micro siemens par centimètre
NTU :	Nephelometric Turbidity Unit
mg/L :	Milligramme par litre
$\mu\text{g}/\text{L}$:	Microgramme par litre
Zn :	Zinc

RESUME

La zone d'étude (permis Kanoumba), propriété de Randgold Resources Limited est située dans la zone de socle du Sénégal. Cette zone fait partie intégrante de la région de socle cristallin marquée par des difficultés d'accès à l'eau surtout en saison sèche, la forte pression anthropique sur ces ressources en eau par les activités minières ainsi que la vulnérabilité de ces ressources à la pollution par les activités minières. Dans la perspective d'une exploitation de ses gisements ce qui peut sérieusement affecter l'AEP des communautés tant du point de vue qualitatif que quantitatif, cette étude dont le principal objectif est de contribuer à améliorer la connaissance sur la qualité des ressources en eau souterraine et de surface disponibles dans la zone d'étude est menée. A cet effet, une campagne d'échantillonnage saisonnier couvrant un réseau de vingt-deux stations (22) de prélèvement dont huit (08) pour les eaux de surface et quatorze (14) pour les eaux souterraines a été menée en Avril (basses eaux) et en Août (hautes eaux) 2018. Les résultats des analyses des eaux échantillonnées comparés avec les recommandations de l'OMS pour l'eau potable et du CCME pour le bon développement des espèces dans les milieux aquatiques montrent que, du point de vue physico-chimique, que les eaux souterraines et de surface sont légèrement acides à neutres avec un degré de minéralisation relativement faible et caractérisées par une importante turbidité surtout en Août. D'un point de vue chimique, le diagramme de Piper montre que les eaux souterraines se répartissent en trois principales familles. Il s'agit des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes, plus importantes, des eaux bicarbonatées sodiques et potassiques et des eaux chlorurées sodiques et potassiques. L'étude des paramètres de pollution a mis en évidence qu'il existe une pollution en éléments traces métalliques des eaux souterraines et de surface notamment en Fer, en Al, en Hg, en Pb, en Sb, Cu et en Ar. Le Fer et l'Al sont les plus représentés dans les toutes les eaux (surface et souterraines) avec des valeurs maximales de 1100 µg/L en Avril et de 16200 µg/L pour le Fer et de 490 µg/L en Avril et de 460 µg/L en Août pour les eaux souterraines. Alors que l'As et le Sb (1300 µg/L en Avril et 320 µg/L) sont des pollutions ponctuelles pour les ouvrages localisés dans les zones minéralisées de Delya et de Massawa centrale zone et donc liées au contexte géologique local par la présence de sulfures (pyrite et arsénopyrite) et de veines de quartz-stibine. Une pollution en Hg est notée dans les eaux de surface et souterraines. Les plus fortes concentrations sont enregistrées en Avril autour des sites d'exploitation artisanale d'or au moment où l'activité d'orpaillage est à son paroxysme, ce qui confirme le caractère anthropogénique de cette pollution mercurielle.

Mots clés : Socle, Kanoumba, eaux souterraines, eaux surface, qualité, éléments traces métalliques.

ABSTRACT

The study area (Kanoumba permit) owned by Randgold Resources Limited is located in the basement zone of Senegal. This area is an integral part of the crystalline basement region marked by limited access to water, especially in the dry season, and the strong anthropic pressure on these resources through mining activities and the vulnerability of these resources to pollution from mining activities. Randgold Resources Limited, as part of a strategy to exploit its gold deposits, this study which aim is to contribute to improving knowledge knowledge of the quality of the surface and groundwater resources available in the study area is being carried out. To achieve this, a seasonal sampling campaign covering a network of twenty-two (22) sampling stations, eight (08) of which were for surface water and fourteen (14) for groundwater, was carried out in April (low water periods) and August (high water periods) 2018. The results of the analyses of the sampled water compared with the WHO guidelines for drinking water and the CCME guidelines for the good development of species in aquatic environments show from a physico-chemical point of view, that groundwater and surface water are slightly acidic to neutral with a relatively low degree of mineralization and characterized by a high turbidity especially in August. From a chemical perspective, Piper's diagram shows that groundwater is divided into three main families. These are calcium and magnesium bicarbonate waters, sodium and potassium bicarbonate waters and sodium and potassium chloride water type. Regarding the pollution parameters, results has shown that there is a pollution of metallic trace elements in both groundwater and surface water, especially in Iron, Al, Hg, Pb, Sb, Cu and Ar. Iron and Al are the most represented in all waters with maximum values of 1100 $\mu\text{g/L}$ in April and 16200 $\mu\text{g/L}$ for Iron and 490 $\mu\text{g/L}$ in April and 460 $\mu\text{g/L}$ in August for groundwater. Whereas As and Sb (1300 $\mu\text{g/L}$ in April and 320 $\mu\text{g/L}$ August) are point pollution for the structures located in the mineralised zones of Delya and Massawa central zone and therefore linked to the local geological context by the presence of sulphides (pyrite and arsenopyrite) and quartz-stibine veins. Hg content is noted in both surface and groundwater. The highest concentrations are recorded in April around artisanal gold mining sites at the time when gold panning activity is at its peak, which confirms the anthropogenic nature of this mercury pollution.

Keywords: Basement, Kanoumba, groundwater, surface water, quality, metallic trace elements.

INTRODUCTION GENERALE

Contexte de l'étude

L'accès à une eau de boisson saine est une condition indispensable à la santé, un droit humain élémentaire et une composante clé des politiques efficaces de protection sanitaire (OMS, 2004). Depuis les années 1980, le secteur de l'eau fait l'objet d'une attention particulière de la part des institutions internationales, comme en attestent les nombreuses conférences internationales qui lui sont dédiées. L'une d'entre elles, intitulée "Bridging the divides for water" « Comblent les écarts en matière d'eau », a souligné les enjeux de la gestion de l'eau à l'échelle planétaire, en particulier la problématique de l'accès à l'eau potable en Afrique (Baron et Bonnassieux, 2011). L'assemblée générale des Nations Unies, pour répondre aux besoins humains, économiques et environnementaux réservent depuis longtemps une place toute particulière à la crise mondiale de l'eau. C'est ainsi qu'en un demi-siècle, elle a consacré trois décennies à l'eau :

- 2018 – 2028 décennie internationale d'action « L'eau et le développement durable » ;
- 2005 – 2015 décennie internationale d'action « l'eau source de vie » ;
- 1981 – 1990 décennie internationale de l'eau potable et de l'assainissement.

Malgré tous les efforts notés, la qualité des eaux dans le monde a connu ces dernières années une grande détérioration, à cause des rejets industriels non contrôlés, de l'utilisation intensive des engrais chimiques dans l'agriculture ainsi que l'exploitation irrationnelle des ressources en eau. Ces derniers ont produit une modification chimique de l'eau en la rendant impropre aux usages souhaités (Belksier *et al.*, 2016). Aujourd'hui, l'importance de cette ressource n'est plus à démontrer pour la survie des écosystèmes naturels et la vie sur notre planète (Barry, 2009).

En Afrique, l'accès comme la disponibilité d'une eau de qualité et en quantité demeure un véritable problème. Selon le Conseil mondial de l'eau, environ 300 millions d'africains n'ont pas accès à l'eau potable¹. Ainsi se perpétue sans bruit une crise humanitaire qui fait chaque jour 3900 victimes parmi les enfants².

Au Sénégal, la question de l'eau est un enjeu national compte tenu de son importance pour différents secteurs d'activités (industrie, agriculture, tourisme, pêche, etc.) (CSE, 2010). Les enquêtes de l'ANSD (2013) ont montré que la zone rurale de la région de Kédougou (abrite notre zone d'étude) présente le plus bas taux d'accès en eau potable avec seulement 11,5%. Or, celle-ci abrite plusieurs gisements miniers parmi lesquels les gisements aurifères de Massawa,

¹ <http://fr.africanews.com/2016/03/23/la-difficile-equation-de-l-eau-potable-en-afrique/> (consulté le 03/08/2018)

² http://www.who.int/water_sanitation_health/2005advocguide/fr/ (consulté le 03/08/2018)

Sofia et Délya collectivement dénommée la mine d'or de Massawa dans le permis de Randgold³, situé à environ 700 km de la capitale Dakar et qui fait l'objet de notre étude. La région de Kédougou, à l'instar des régions de socle se caractérise par :

- une configuration géologique, structurale et hydrogéologique qui fait que les aquifères sont peu productifs, difficilement mobilisables et très vulnérables à la pollution ;
- le plus bas taux accès eau potable 11,5% (ANSD, 2013) ;
- des ressources en eaux utilisées à de multiples fins sans pré-traitement ; et
- une forte pression anthropique sur ces ressources par les activités minières.

Cette situation pourrait s'accroître avec la mise en exploitation des gisements susmentionnés. En effet, l'exploitation minière industrielle comme artisanale et à petite échelle amènent des retombées socio-économiques importantes mais elles portent généralement préjudice à l'environnement et affectent considérablement les ressources naturelles. La ressource la plus affectée est sans conteste l'eau par son utilisation pour le traitement du minerai et par le rejet des effluents ce qui en fait, selon la FEPS (2008), la « principale victime de l'exploitation minière ». En effet, l'activité extractive nécessite de grandes quantités d'eau ce qui constitue une menace importante sur les ressources en eau. En plus, avec l'utilisation de produits chimiques (mercure, cyanure etc.) dans le traitement des minerais et les rejets de matières en suspension et d'éléments traces métalliques (ETM) issus des produits de l'activité minière, les risques de contamination des hydrosystèmes s'accroissent. La mise en exploitation des gisements de la compagnie pourrait sérieusement affecter l'AEP des communautés et les hydrosystèmes tant du point de vue qualitatif que quantitatif. Pour Ouédraogo (2016), l'exploitation de ces potentialités économiques doit s'appuyer avant tout sur une parfaite maîtrise et une gestion rationnelle de l'eau. De plus, la gestion optimale de la ressource en eau, en quantité comme en qualité, est une condition essentielle du développement durable (CSE, 2015). Ainsi, la satisfaction de la demande pour l'approvisionnement en eau potable (AEP) des communautés est plus que prioritaire et reste un défi majeur pour l'atteinte des objectifs de développement durable (ODD). De plus, la volonté du Sénégal à assurer la sécurité de l'eau pour la paix et le développement se traduit par son engagement à accueillir la communauté mondiale de l'eau en 2021 dans ses terres. C'est pourquoi, la connaissance de la qualité des ressources eaux souterraines et de surface dans le permis Kanoumba est impérative. Surtout que celles-ci sont au cœur de toutes les activités car participent à de nombreux usages. Malheureusement, la qualité de ces ressources en eau n'est pas connue par bon nombre

³ Nous tenons à avertir le lecteur sur le fait qu'en Janvier 2019, la compagnie Randgold Resources Limited (RRL) a fusionné avec le groupe Barrick pour former le groupe Barrick Gold Corporation. Mais puisque nous avons commencé nos recherches en 2018, nous avons fait le choix de conserver le nom de Randgold dans ce document.

d'utilisateurs. De plus, ces eaux ne sont pas soumises à des traitements adéquats avant usage. Une bonne partie des utilisateurs « considèrent » que la qualité de ces ressources en eau dépend essentiellement de sa clarté et le constat qui est fait localement est que ces ressources en eau souterraine et de surface sont directement utilisées sans traitement par les populations dans les villages environnants pour l'AEP, les usages domestiques, l'abreuvement du bétail mais aussi pour le lavage des minerais sur les sites d'orpaillage. C'est dans ce cadre que s'inscrit cette étude dont le but principal est de « **Contribuer à améliorer la connaissance de la qualité des ressources en eaux souterraines et de surface dans le permis Kanoumba** ».

Ce travail de recherche, qui s'inscrit dans le cadre d'un mémoire de fin d'études de master en Sciences de l'Environnement, a pour principal objectif de :

- ✚ Contribuer à améliorer la connaissance de la qualité des ressources en eaux souterraines et de surface dans le permis Kanoumba.

Avec comme objectifs spécifiques :

- ✓ **objectif spécifique 1** : Faire la caractérisation hydrologique et hydrogéologique du permis Kanoumba.
- ✓ **objectif spécifique 2** : Faire la caractérisation hydrochimique du permis Kanoumba.
- ✓ **objectif spécifique 3** : Evaluer la qualité des ressources en eaux de surface et souterraine du permis Kanoumba.

Ce manuscrit est organisé suivant un plan détaillé en quatre (04) chapitres et une conclusion générale. Il est structuré de la façon suivante :

Le premier chapitre, « **Présentation générale de la zone d'étude** », est consacré à la description des caractéristiques physiographiques (géomorphologiques, végétation, faunistiques, floristiques, climatiques et hydrologiques) et humains relatifs à la zone d'étude.

Le deuxième Chapitre, « **Contexte géologique, hydrologique et hydrogéologique** », décrit dans un premier temps le cadre géologique du craton Ouest-africain, de la boutonnière de Kédougou-Kéniéba et le contexte géologique local du permis Kanoumba. Puis dans un second temps, il fait la caractérisation des ressources en eaux souterraines et de surface présente dans la zone d'étude.

Le troisième chapitre, « **Matériels et méthodes** », a pour objet d'expliquer les méthodes et matériels utilisés pour accéder aux nombreux paramètres et données étudiés dans ce mémoire.

Le quatrième chapitre, « **Résultats et discussion** », est consacré à l'analyse, à l'interprétation et à la discussion des résultats fournis par les différentes techniques de traitement de données.

Conclusion générale, elle fait une brève présentation de la zone d'étude, du matériel et des méthodes de travail utilisée ainsi que des résultats obtenus.

CHAPITRE 1 : PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

1.1. Situation géographique

Le permis Kanoumba qui fait de notre étude a été accordé en 2016 par le ministère en charge des mines à la compagnie Randgold Resources Limited (RRL). Il est situé dans les départements de Saraya et de Kédougou, dans la région de Kédougou, au sud-est du Sénégal, à environ 700 km de la capitale Dakar (fig 1). Il est né de la fusion, en avril 2010, des permis de Kanoumériing et de Kounemba, et s'étend sur une superficie d'environ 601 km².

Son accès est rendu possible par deux pistes latéritiques carrossables :

- l'une d'elle relie Bembou à Bambaraya en passant par Mandinkoling, Khossanto et Mamakono, et
- l'autre relie Mako à Sabodala en passant par Kanoumériing, Thianguel bassadié et Tinkoto.

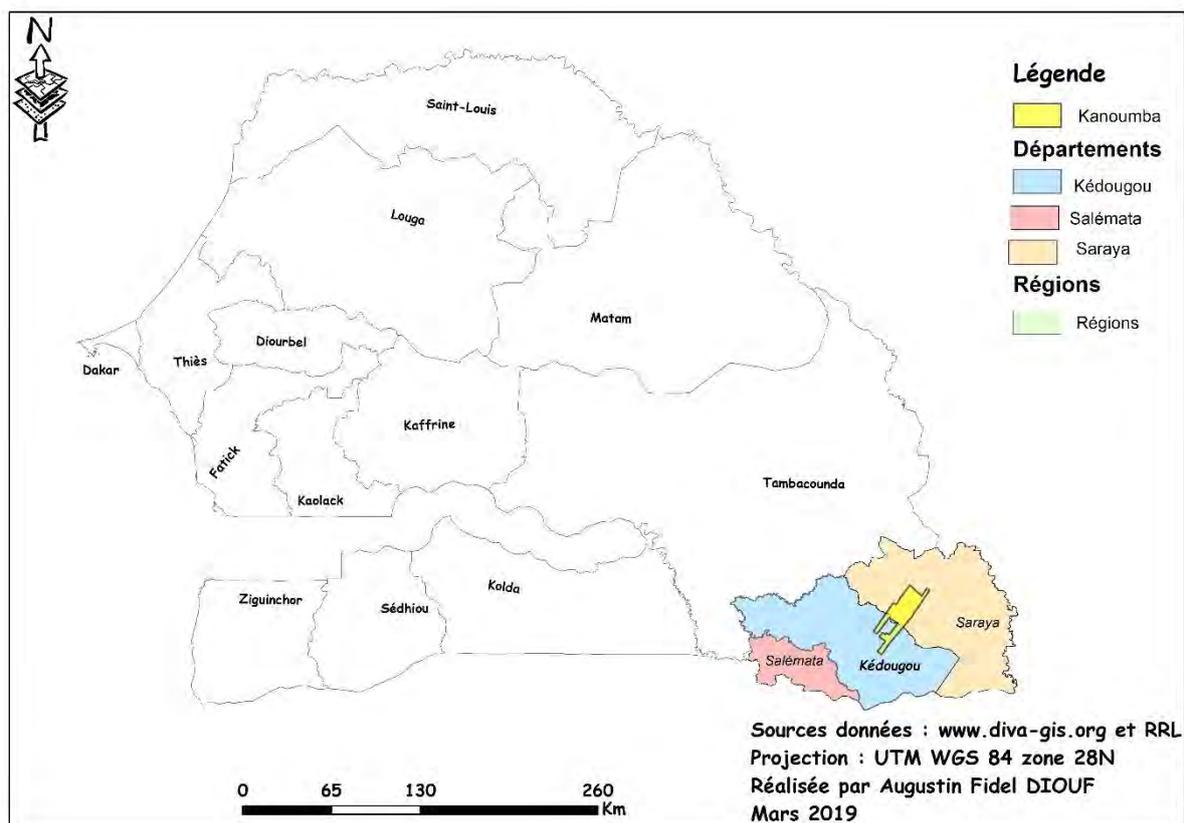


Figure 1 : Carte de localisation du permis Kanoumba

1.2. Climat

Le climat joue un rôle déterminant dans le cycle hydrologique. Il régit la répartition spatiotemporelle de la ressource hydrique et conditionne son potentiel hydrogéologique. De ce fait, la connaissance des conditions climatiques s'impose pour définir les différents étages

bioclimatiques marquant la zone étudiée (Bounouira, 2007). Ici, nous étudierons essentiellement trois paramètres climatiques à savoir, la température, l'évaporation et les précipitations dans la région de Kédougou. Les données recueillies à la direction de l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM) enregistrées à la station de Kédougou au cours de la période de 1989 à 2018, nous permettront d'analyser ces paramètres sur une période de trente (30) ans.

1.2.1. Précipitations

Les précipitations constituent l'unique « entrée » des principaux systèmes hydrologiques continentaux que sont les bassins versants, ainsi elles constituent un paramètre hydro-climatologique d'une grande importance dans leur fonctionnement (Bounouira, 2007).

Notre zone d'étude est comprise entre les isohyètes 1000 mm à 1200 mm et appartient à la zone sud-soudanienne. Dans ladite zone, la variable pluie constitue la principale entrée du système hydrologique. Elle est caractérisée par l'alternance de deux saisons :

- une saison sèche de Novembre à Mai ; et
- une saison des pluies de Juin à Octobre.

La moyenne pluviométrique annuelle durant la période (1989-2018) est de 1209 mm à Kédougou. Cette valeur montre que la zone d'étude est bien arrosée durant la saison des pluies. Ainsi, dans la zone, les pluies commencent en fin Mai et se prolongent jusqu'en octobre soit en moyenne 5 mois pluvieux. Le maximum des précipitations est enregistré en Août avec des cumuls pouvant atteindre 330 mm. (fig. 2).

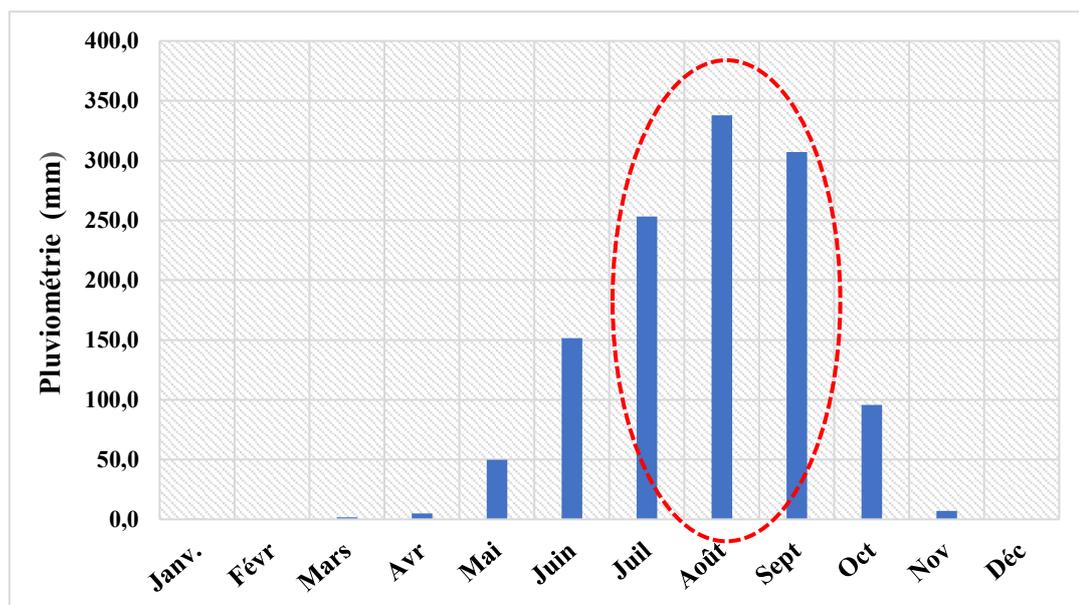


Figure 2 : Moyennes mensuelles de la pluviométrie à Kédougou de 1989 à 2018

1.2.2. Température

La température de l'air est l'une des composantes principales du climat. Elle constitue également un facteur primordial en hydrologie. Elle contrôle l'intensité de plusieurs paramètres du cycle de l'eau dont l'évaporation, la transpiration des végétaux. De ce fait, la caractérisation et l'identification du contexte climatique de Kanoumba doit comporter obligatoirement, entre autres, l'étude de la température de l'air ambiant.

L'analyse de l'évolution de la température durant la période (1989-2018) montre :

- des moyennes mensuelles des minima oscillant entre 17 °C en Décembre et 26,2 °C en Mars et Avril ; et
- celles des maxima, quant à elles qui oscillent entre 31,5°C en Août et 39,3°C et 40,7°C en Mars et Avril. Ces derniers constituent les mois les plus chauds dans la zone (fig. 3).



Figure 3 : Moyennes mensuelles des minima, moyennes et maxima de la température à Kédougou de 1989 à 2018

1.2.3. Ecart pluviométrique

L'analyse des variations interannuelles permet de voir que les fluctuations des hauteurs annuelles ne sont pas uniformes. Nous observons des années « sèches », des années normales et des années « humides » autrement dit, des années de pluviométrie déficitaire, normale et excédentaire. Le calcul des écarts pluviométriques nous a permis également de délimiter les périodes normales, excédentaires, et déficitaires (Fig. 4). L'observation des chroniques d'écart pluviométrique sur la période 1989-2018 se résume dans le tableau 1.

L'écart pluviométrique E est donné par la formule suivante :

$$E = \frac{x - \bar{x}}{\bar{x}} \quad (1)$$

x = cumul annuel ; \bar{x} = moyenne annuelle

Tableau 1 : Chroniques d'écart pluviométrique sur la période 1989-2018

Période excédentaire	Période déficitaire
- 1997 à 2005 ; et	- Avant 1996 ; et
- 2010 à 2018	- 2006 à 2009 ; et

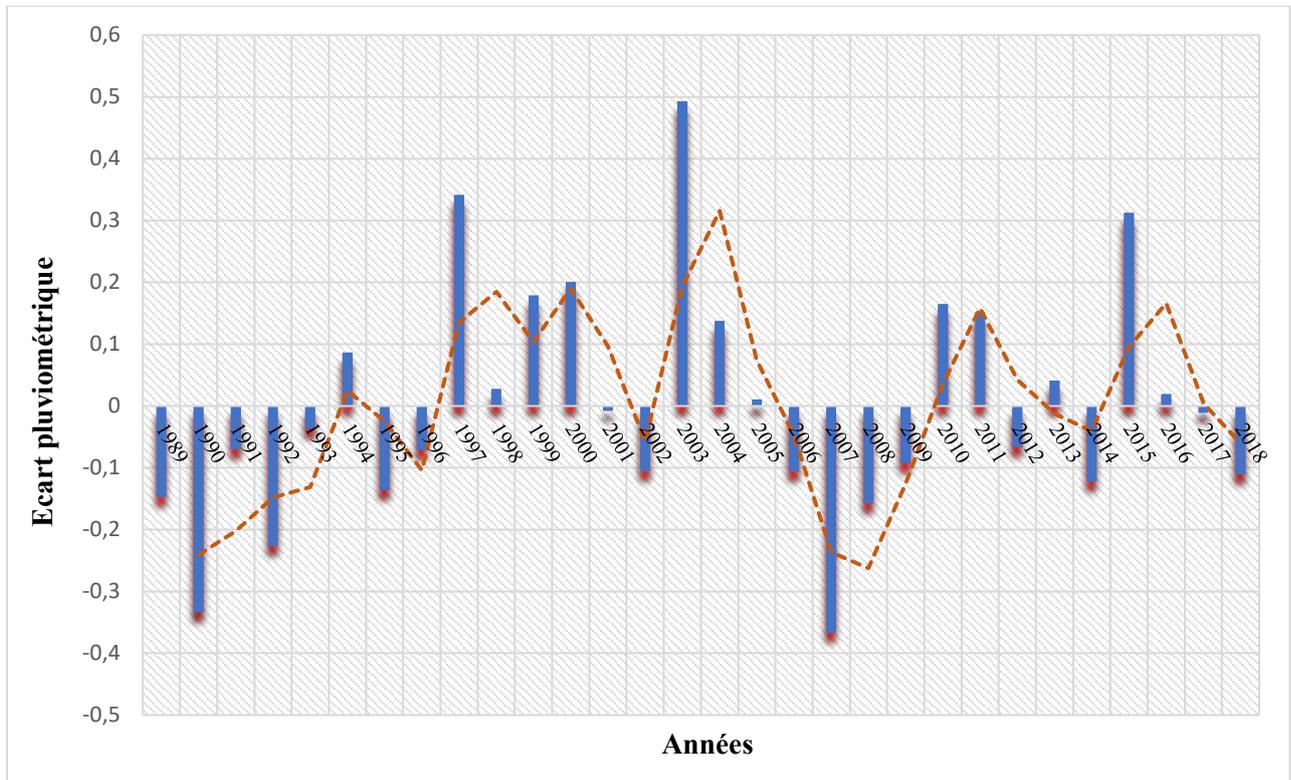


Figure 4 : Evolution des écarts à la moyenne annuelle de la pluviométrie à Kédougou de 1989 à 2018

1.2.4. Evaporation

L'évaporation ou la vaporisation se définit comme étant le passage de la phase liquide à la phase vapeur, il s'agit de l'évaporation physique. Les plans d'eau et la couverture végétale sont les principales sources de vapeur d'eau. Le principal facteur régissant l'évaporation est la radiation solaire. Le terme évapotranspiration englobe l'évaporation et la transpiration des plantes. Dans la zone d'étude, l'évaporation est une composante fondamentale du cycle hydrologique. Son étude est essentielle pour connaître le potentiel hydrique de la zone ou d'un bassin versant. L'observation des chroniques d'évaporation sur la période 1989-2018 montre que les mois de Mars (9,9 mm) et d'Avril (9,9mm) présentent les moyennes mensuelles d'évaporation les plus élevées. Alors que les moyennes mensuelles d'évaporation les plus faibles sont observées durant la saison des pluies en Juillet, Août et Septembre avec des valeurs respectives de 2,2mm et de 1,6mm pour les deux derniers (fig.5).

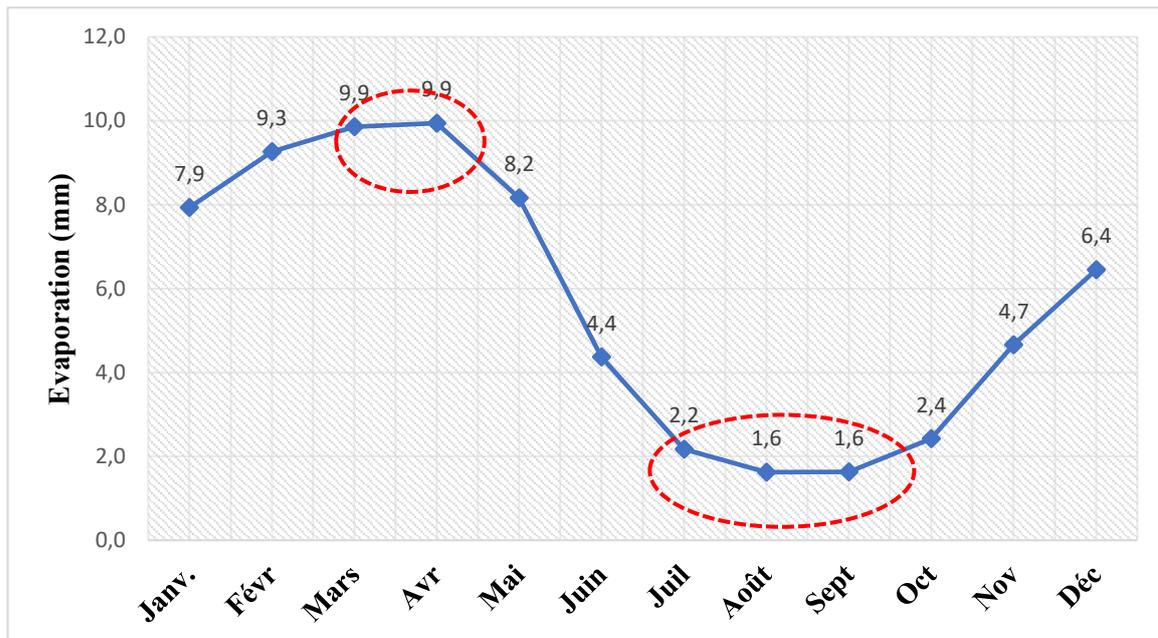


Figure 5 : Moyennes mensuelles de l'évaporation à Kédougou de 1989 à 2018

1.3. La géomorphologie

1.3.1. Le relief

Le secteur d'étude faisant partie du Sénégal Oriental où le relief est très marqué et correspondant à la zone d'altitude la plus élevée du territoire sénégalais. C'est en effet, au niveau du Sénégal Oriental que l'on rencontre le point culminant du pays à 581 m d'altitude (Mont Sambalou) (Wuilleumier et *al.*, 2010). La plaine couvre une grande partie du permis Kanoumba avec des altitudes comprises entre 92 et 342 m (fig.6). Selon Fall (2016), Kanoumba présente un relief accidenté de type érosionnel, où des plateaux latéritiques et des collines surplombent des plaines où se dessinent des réseaux hydrographiques. Un réseau de petits massifs rencontrés dans la zone étudiée suit une direction NNO- SSE depuis le secteur de Massawa en allant vers Makana, Bambaraya Mba et Bambaraya Ndi et constitue la ligne de crête qui sépare les bassins versants (BV) de la Gambie et de la Falémé. (fig.6).

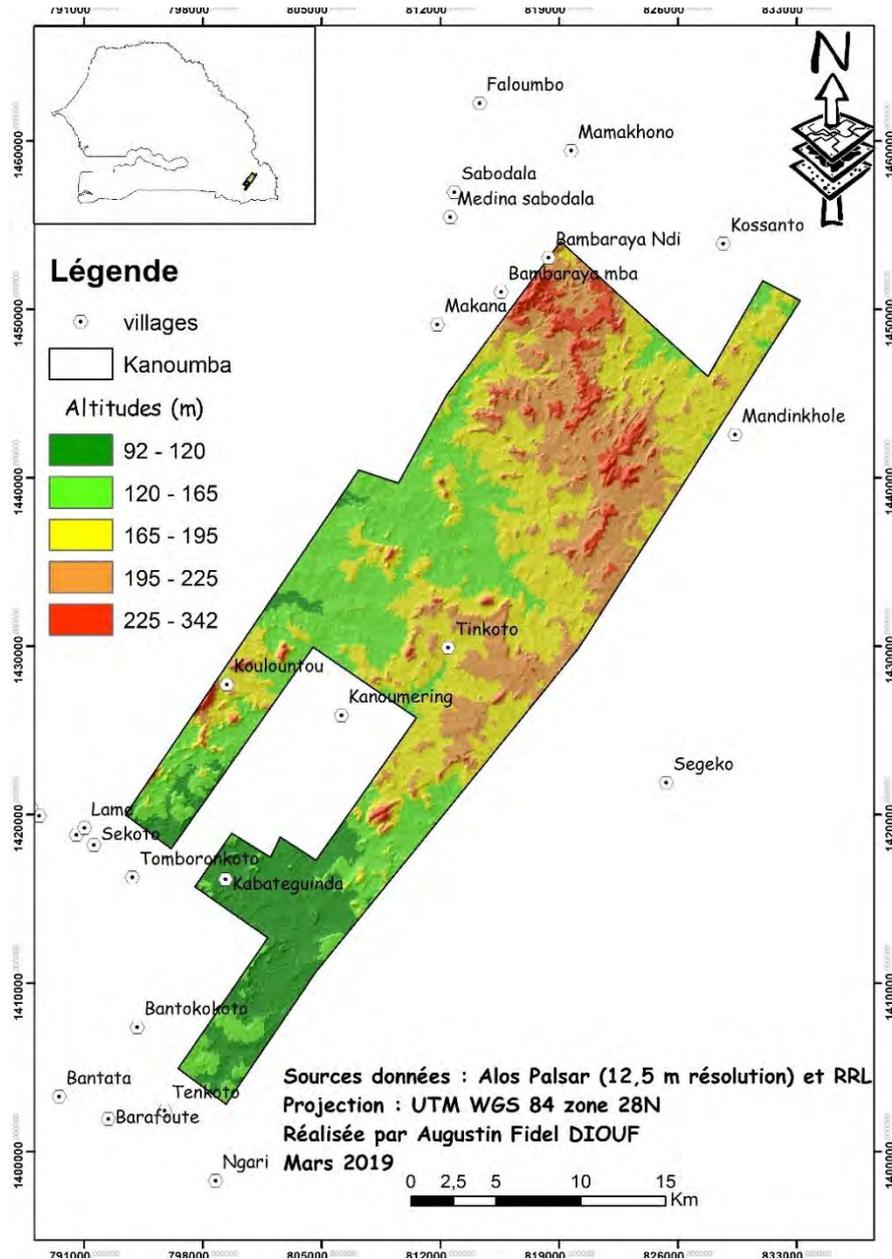


Figure 6 : Carte de répartition des altitudes dans le permis Kanoumba (extrait des images Alos Palsar 12.5 m de résolution)

1.3.2. Pentés

En termes de pente, la zone d'étude se caractérise par des terrains présentant une pente moyenne plus forte que celles rencontrées dans le reste du pays. Dans le permis Kanoumba, les plateaux latéritiques couvrent la plus grande superficie avec des pentes relativement faibles et variant entre 2 à 10%. Les zones de plus faibles pentes comprises entre 0 et 2% correspondent au lit des cours d'eau. Cependant, des pentes fortes ne dépassant pas 40% sont rencontrées dans le permis Kanoumba. Ces dernières (pentes) sont rencontrées dans la partie nord du permis le long des collines orientées NNO-SSE vers Koulountou, Bambaraya Ndi, Bambaraya Mba (fig. 7).

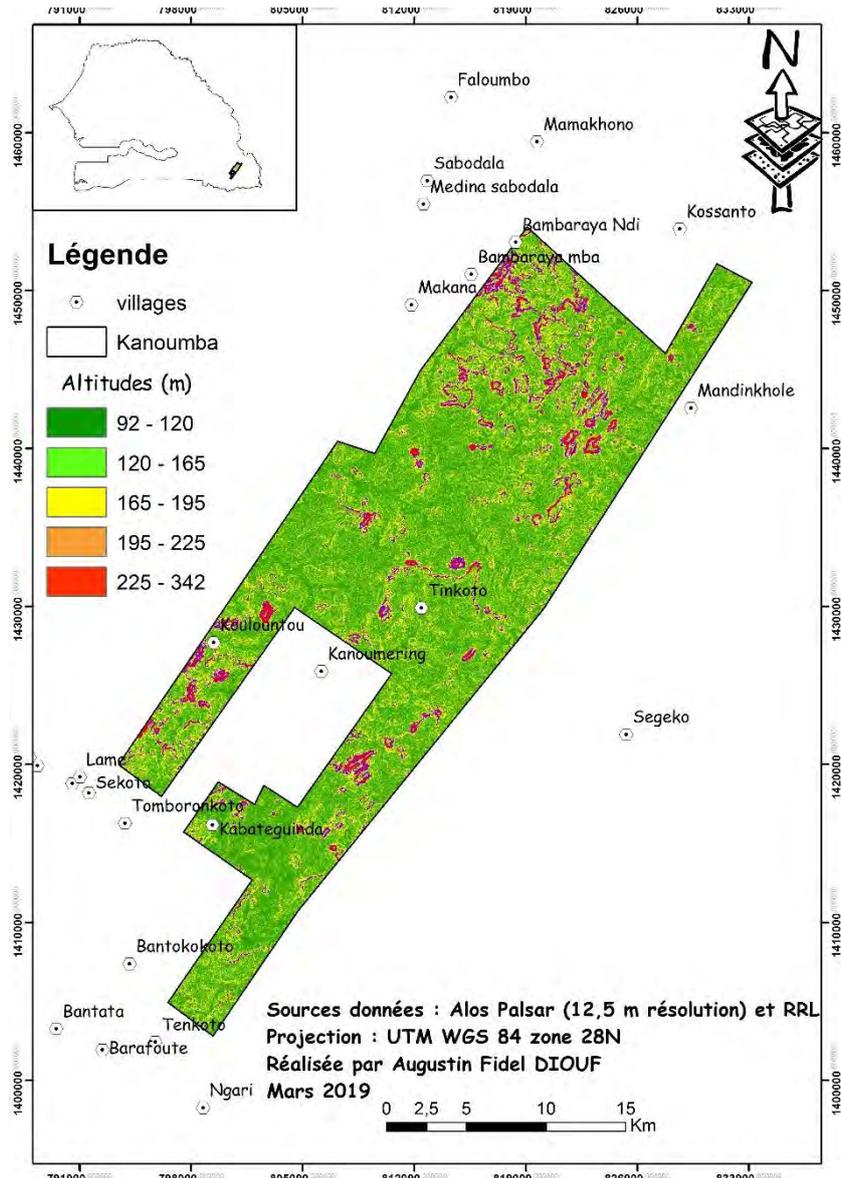


Figure 7 : Carte de répartition des pentes dans le permis Kanoumba (extrait des images Alos Palsar de 12.5 m de résolution)

1.4. Hydrographie

La région de Kédougou a un important réseau hydrographique qui est très dense et fortement lié à la pluviométrie. Les principaux cours d'eau de la région sont :

- la Falémé à l'Est avec ses affluents : le Dialé, la Daléma et le Boboti.
- le fleuve Gambie (photo. 1) et ses affluents : le Thiokoye, le diagri, le Diahra, le Koulountou, le Niaoulé, le Niokolo et le Niériko.

Ces cours d'eau ont des régimes qui sont étroitement liés à la pluviométrie.

Dans le permis Kanoumba, ces cours d'eau jouent un rôle important dans le développement local par le biais des cultures maraichères, l'approvisionnement en eau des populations et l'abreuvement du bétail, le traitement du minerai dans les sites d'orpaillage. La pêche est aussi pratiquée sur le fleuve Gambie (photo. 1) par les populations riveraines.



Photo 1 : Vue du fleuve Gambie à Mako (Crédit photo : Base de données RRL, 2017)

1.5.Végétation, Flore et Faune

1.5.1. Végétation et Flore

Dans son ensemble, la végétation dans la zone d'étude (photo 2) est constituée de savanes (boisées, arborées, arbustives et savane herbeuse) (Wuilleumier et *al.*, 2010). Le long des cours d'eau, il est noté des forêts galeries. Celles-ci constituent une végétation verdoyante, luxuriante, dominée à certains endroits par les rôniers (*Borassus akeassi*) et par des peuplements de bambous (*Oxythenantera abyssinica*). Au niveau des savanes (boisées et arborées), les espèces ligneuses les plus fréquentes sont : *Pterocapus erinaceus*, *Bombax costatum*, *Cordyla pinnata*, *Detarium microcarpum*, *Combretum glutinosum* (Wuilleumier et *al.*, 2010). Le tapis herbacé est très dense en début de saison sèche (peut atteindre 3m de hauteur), il disparaît dès le mois de janvier à cause des feux de brousse qui sévissent la zone.

Dans le permis Kanoumba, la flore est riche et diversifiée. Malheureusement, elle fait face à beaucoup de pressions liées aux feux de brousse, à l'extraction minière artisanale et à petite échelle d'or, à l'exploitation minière à grande échelle, à l'exploitation illicite de bois, l'exploitation de la sève des rôniers, les défrichements, l'utilisation des produits forestiers, tels que les pailles et le bois pour le combustible. Cependant, les travaux d'inventaires floristiques effectués dans le permis Kanoumba ont permis de retrouver selon le statut de l'espèce :

- deux espèces intégralement protégées par le code forestier telles que : *Vitellaria paradoxa* (karité), *Diospyros mespiliformis* (ébène d'Afrique) ; et
- des espèces partiellement protégées par le code forestier telles que :

Adansonia digitata (baobab), *Pterocarpus erinaceus* (vène), *Acacia senegal* (gommier blanc), *Tamarindus indica* (tamarinier), *Cordyla pinnata* (poirier du Cayor), *Grewia bicolor*, *Prosopis africana*, *Borassus akeassii* (rônier), *Azelia africana* (doussié, lingué), *Ziziphus mauritiana* (jajubier tropical), *Khaya senegalensis* (caïlcédrat).



Photo 2 : végétation dense dans le permis Kanoumba (Crédit photo : DIOUF, 2018)

1.5.2. Faune

La faune est très diversifiée du fait de la proximité du parc de Niokolo Koba qui est inscrit sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO depuis 1981 et qui représente l'une des plus grandes réserves animales d'Afrique. De ce fait, des espèces emblématiques comme les chimpanzés (photo. 3), les lions, les léopards, les lycaons, les élans de derby etc. qui peuplent le parc sont parfois signalées dans le secteur. Selon Wuilleumier et al (2010), il est aussi fréquent de rencontrer des phacochères, des singes et de la famille des cynocéphales, et aussi de nombreux oiseaux (pintades, francolins, tourterelles, et de nombreuses petites espèces au plumage aux teintes vives). Des serpents sont aussi présents avec le python, le naja, des vipères et des couleuvres.



Photo 3 : image de chimpanzés présents dans le permis Kanoumba (Crédit photo :base de données RRL 2018)

1.6. Populations et activités socio-économiques

Le périmètre Kanoumba qui est situé à cheval entre les communes de Tomboronkoto, Bembou, Khossanto et Sabodala se caractérise par une diversité ethnique importante marquée par la prédominance de deux grands groupes : Les Peulhs et les Mandingues (Malinkés et de Diakhankés). On relève la présence d'ethnies dites minoritaires formées, pour l'essentiel, de Bassaris, de Bediks et de Koniaguis.

Les communautés vivant dans le permis Kanoumba sont essentiellement des orpailleurs, des éleveurs (vaches, chèvres et moutons) et des cultivateurs. Bien que les cultures soient de subsistance, elles sont confrontées à l'utilisation de moyens rudimentaires et à une saison sèche relativement longue. Les produits cultivés sont essentiellement le maïs, le mil et l'arachide. Dans certaines zones du périmètre on rencontre d'autres variétés culturales telles que le riz, le gombo, le fonio, la pastèque, le melon, le piment, le haricot, l'aubergine, la canne à sucre, le sorgho, le coton et rarement des cultures maraichères ainsi que des activités de jardinage. La pêche, à petite échelle se pratique au niveau du fleuve Gambie. Dans la zone d'étude, l'extraction minière artisanale et à petite échelle (EMAPE) d'or occupe une bonne partie de la population particulièrement les populations du village aurifère de Tinkoto. L'EMAPE d'or constitue un facteur attractif pour les originaires d'autres régions du pays mais surtout pour les populations de la sous-région. C'est ainsi que des guinéens, maliens, burkinabés, nigériens, ghanéens entre autres nationalités constituent l'essentiel de la population étrangère. On les retrouve principalement dans les zones d'orpaillage telles que le village de Tinkoto et Bantako.

1.7.Conclusion partielle

L'étude de la zone d'étude a permis de faire la description des caractéristiques physiographiques (géomorphologiques, végétation, faunistiques, floristiques, climatiques et hydrologiques) et humains relatifs à la zone d'étude. Ainsi, elle a permis de connaître que la zone d'étude est caractérisée par :

- une faune et flore riche et bien diversifiée ;
- des amplitudes thermiques très accusées et de fortes évaporations enregistrées durant la saison sèche entre les mois de Mars et d'Avril ;
- les précipitations 1000 mm à 1200 mm et donc appartient à la zone sud soudanienne ;
- un relief accidenté avec des altitudes comprises entre 92 m à 342m ;
- deux principaux cours d'eaux à savoir la Falémé et la Gambie ; et
- une diversité ethnique marquée par la prédominance de deux grands groupes : les Peulhs et les Mandingues (Malinkés et Diakhankés) ;

CHAPITRE 2 : CONTEXTE GEOLOGIQUE, HYDROLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

Du point de vue géologique le Sénégal comprend trois grands ensembles : le bassin sédimentaire sénégalo-mauritano-guinéen d'âge méso-cénozoïque qui recouvre les $\frac{3}{4}$ du territoire sénégalais, le bassin de Madina Kouta et le socle précambrien au sud-est du pays (qui abrite la zone d'étude). Ce dernier, marqué par une géologie très complexe, appartient au Craton Ouest Africain (COA).

2.1. Cadre géologique

2.1.1. Craton Ouest-africain

Daté de 2,7 Ga, le COA couvre une superficie de 4,5 millions de km². Il est essentiellement formé par trois (03) unités majeures : la **Dorsale Réguibat** au Nord, la vaste **Dorsale de Léo-Man** au Sud et au centre, les **Boutonniers de Kédougou- Kéniéba** (BKK) à cheval entre le Sénégal et le Mali et de **Kayes** (prolongement malien de la BKK) (fig.8).

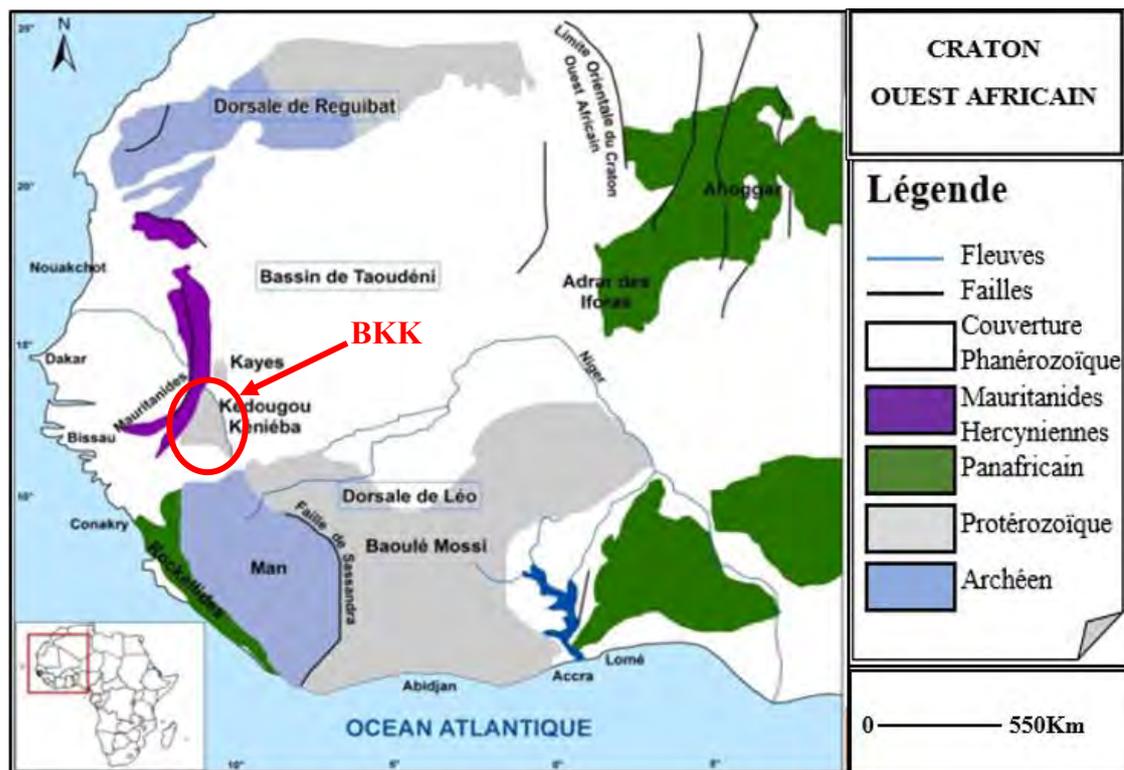


Figure 8 : Ensembles litho-structuraux du craton ouest africain (Black, 1980) (modifiée)

2.1.2. Boutonnière de Kédougou-Kéniéba

Vaste d'une superficie d'environ 15.000 km² (Dioh et al., 1999), la boutonnière de Kédougou-Kéniéba (BKK) est située à l'extrémité Ouest du craton Ouest-africain. Elle couvre le secteur du Sénégal oriental et une petite portion de l'Ouest du Mali, de part et d'autre de la Falémé.

Elle est limitée sur sa marge occidentale par la chaîne hercynienne des Mauritanides et son prolongement sud les Bassarides et sur tous les autres côtés par les sédiments Néoproterozoïques du bassin de Taoudéni (fig 9). Du point de vue structural, la BKK est rattachée à deux zones transcurrentes majeures : la Main Transcurrent Zone (MTZ), qui marque la limite entre le supergroupe de Mako et celui de Dialé-Daléma. Il s'agit d'une grande zone de cisaillement ductile globalement orientée NE-SW devenant N-S vers le Nord ; la faille sénégal-malienne (SMF), d'orientation globale N-S, suit grossièrement le trajet de la Falémé. A ces deux accidents majeurs s'ajoute la faille de Sabodala d'orientation N-S et qui constitue un accident ductile transcurrent sénestre (Ngom, 1995). Les travaux de Bassot (1996) sur la boutonnière ont permis de la subdiviser en deux supergroupes :

- le supergroupe de Mako, à l'Ouest, constitué par un important complexe volcanique et volcano-sédimentaire ; et
- le supergroupe du Dialé et de la Daléma à dominante sédimentaire (séries détritiques à passées carbonatées), avec dans le secteur de la Daléma un complexe volcanique calco-alcalin » (Ngom, 1989).

2.1.2.1. Super groupe de Mako

Le supergroupe de Mako est constitué essentiellement par une alternance de formations volcaniques basiques (métabasaltes, métagabbros, pyroclastites) et de formations métasédimentaires (quartzites, métapélites, calcaires) en proportions variables suivant les secteurs. Ces formations épimétamorphisées et déformées (plis cartographiques et schistosité associée, clivage de crénulation postérieur) lors de l'orogénèse birrimienne (Ngom, 1989).

Le supergroupe de Mako est intrudé par le batholithe de Badon-Kakadian et les massifs plutoniques comme le granite de Tinkoto (2074 ± 9 Ma) et les corps plutoniques s'exprimant sous forme de sills et de dykes allant du pôle basique au pôle acide (Gueye et al. 2007).

2.1.2.2. Supergroupe de Dialé-Daléma

Les travaux de Ndiaye (1997) montrent que le supergroupe de Dialé-Daléma est formé d'un ensemble sédimentaire et volcanosédimentaire (quartzites, cipolins, grès, conglomérats, tufs épicycliques) plissé isoclinement et schistosé au cours d'une phase de déformation majeure accompagnée d'un métamorphisme régional schistes verts. Cette schistosité peut être reprise localement par une crénulation. Cet ensemble est recoupé par un important complexe magmatique qui comprend des granitoïdes (granodiorites et granités), des roches hypovolcaniques (microdiorites, microgranodiorites, albites), des laves (andésites, rhyodacites) ainsi que des roches pyroclastiques. Les granitoïdes présentent des structures planaires qui sont dans la prolongation de la schistosité de l'encaissant (Ndiaye et al., 1997).

Le supergroupe du Dialé et de la Daléma est intrudé par un ensemble de massifs plutoniques imbriqués constituant le batholite syntectonique de Saraya.

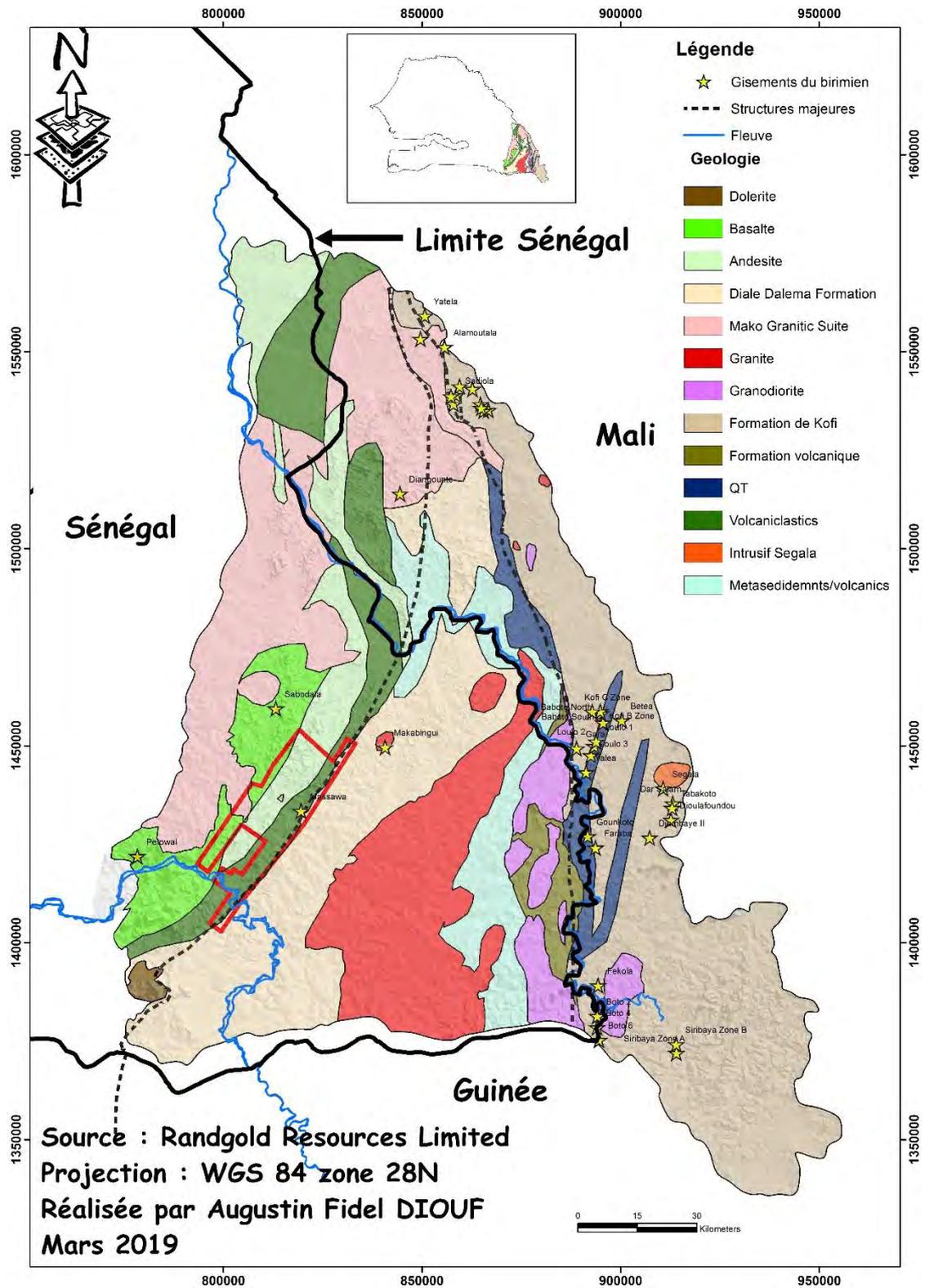


Figure 9 : Carte de la Boutonnière de Kédougou Kéniéba (Base de données RRL, 2019)

2.2. Géologie de la zone d'étude

2.2.1. Lithologie, altérations et structures

Le permis de Kanoumba est à cheval entre le Super-groupe de Mako et le Super-groupe de Dialé-Daléma. Ce permis a fait l'objet de travaux considérables combinant des travaux de reconnaissance, géochimie, géophysique, cartographie, imagerie satellitaire et des sondages multiformes sur des cibles spécifiques qui ont abouti à la découverte des gisements de Massawa, Sofia et de Delya collectivement dénommés la mine d'or de Massawa. Les travaux de Ndong (2014) sur le permis Kanoumba montrent que la séquence lithologique est formée principalement de roches volcanoclastiques (tuf, tuf à lapilli) à l'ouest, et de grauwackes à l'est. Le litage s'oriente entre 200° et 220°, et plonge de 75° à 80° vers l'ouest. Ces faciès sont intrudés par des sills de gabbro, des dykes de porphyres de quartz et de feldspath (QFP), ainsi que des réseaux de veines diverses. Le métamorphisme est de type schiste vert. L'altération hydrothermale se traduit par la présence de silice, de séricite, de carbonate et de chlorite. L'altération météorique se manifeste par l'oxydation et la ferruginisation. Au plan structural, Ndong (2014) et Fall (2016) montrent que le permis de Kanoumba est traversé par trois principaux couloirs de cisaillement : la MTZ, de direction N030°, la faille nord-sud de Sabodala, et le couloir cisailant N030° de Khossanto. A côté de ces structures de dimension régionale, il existe un réseau assez dense de structures secondaires, souvent conductrices de fluides riches en silice, kaolinite ou séricite.

2.2.2. Présentation des systèmes de minéralisation

➤ Secteur de Massawa

Le système minéralisé de Massawa s'étend sur quatre kilomètres, le long de la MTZ, aux confins des Super-groupes de Mako et de Dialé-Daléma. Les travaux de Ndiaye (2013) sur le permis Kanoumba montre que la minéralisation, structurellement contrôlée, se trouve dans diverses lithologies et est localement associée à la bréchification et la fracturation. Elle est constituée de deux phases :

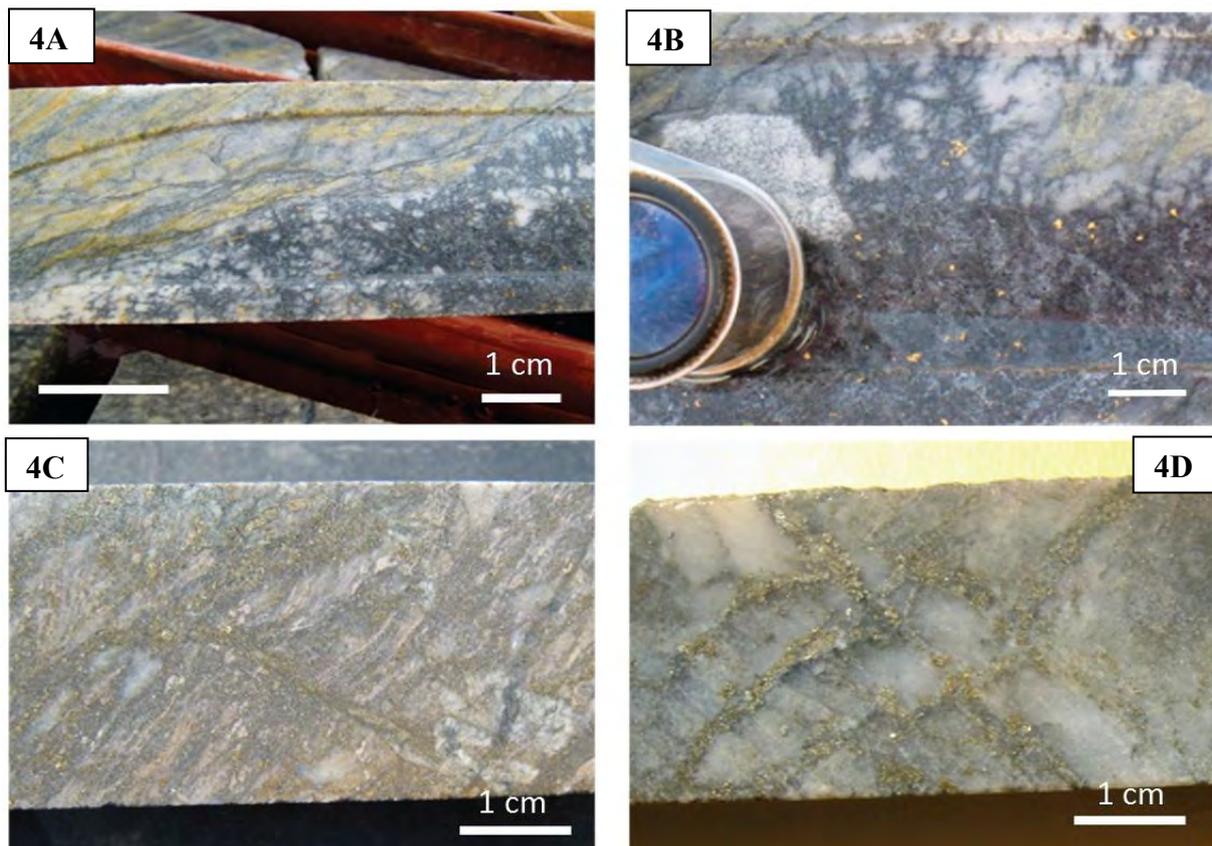
- une phase précoce, où l'or se présente en grains fins, souvent disséminés dans des sulfures (pyrite et arsénopyrite) ; et
- une phase tardive, où on a de l'or visible dans des veines de quartz-stibine. Cette phase se surimpose à la phase précoce (photos 4A, 4B, 4C et 4D).

➤ Secteur de Delya

Dans ce secteur, l'assemblage minéralisation et altération constitué de séricite-silice-carbonate et chlorite est associé à une forte teneur en arsénopyrite fine disséminée et de la pyrite. L'arsénopyrite prédomine sur la pyrite (dans des proportions similaires à la Zone Nord de Massawa). L'or est essentiellement réfractaire et est enfermé dans le réseau cristallin de l'arsénopyrite (Quick *et al.*, 2018).

➤ **Secteur de Sofia**

Ici, la minéralisation est définie par une présence importante de pyrite fine disséminée (1 %) accompagnée d'une forte altération en quartz, albite et carbonate. La minéralisation se produit dans des intrusives intermédiaires altérées quartz-albite comme à Sofia Main, avec du quartz ± de la magnétite ± du chlorite. La minéralisation dans les veines dans l'encaissant mafique est associée dans l'espace avec des cisaillements riches en chlorite avec des veines de carbonate de silice (Quick *et al.*, 2018).



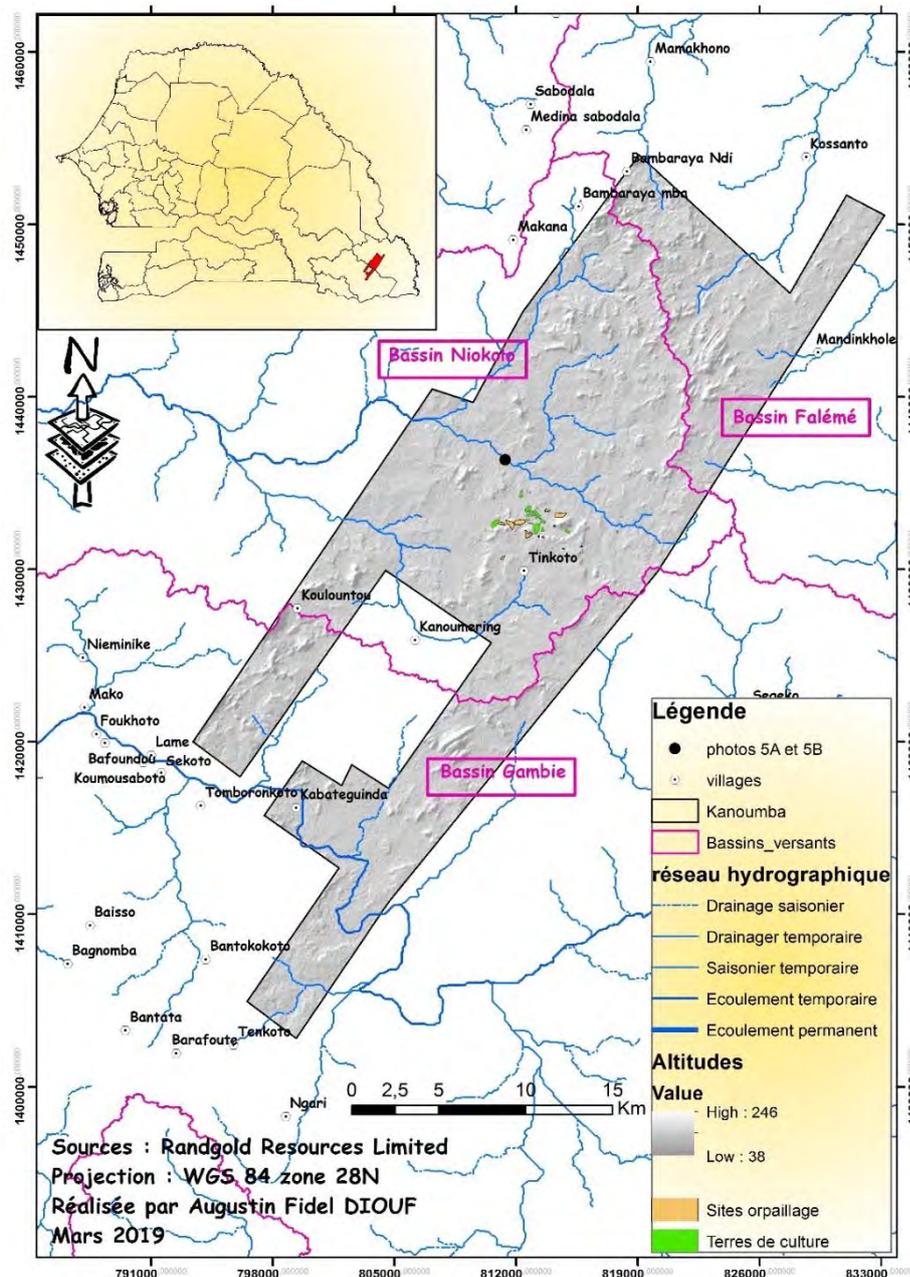
Photos 4A, 4B, 4C et 4D : images de carottes illustrant les styles d'altération et de minéralisation qui existe dans la zone d'étude. Veine de quartz-stibine-Au avec altération séricite-carboné à proximité de la roche encaissante volcanoclastique et avec de la pyrite et de l'arsénopyrite disséminées dans la roche intrusive (4A), Or grossier visible associé aux veinules de stibine (4B), Roche silicifiée avec de la pyrite distale disséminée et en veinules avec de plus faibles quantités d'arsénopyrite (4C et 4D). (Rapport de faisabilité RRL, 2018)

2.3. Hydrologie et hydrogéologie de la zone d'étude

2.3.1. Hydrologie de la zone d'étude

Le permis Kanoumba vaste d'une superficie de 601 Km² se caractérise par un chevelu hydrographique assez dense matérialisé par la rencontre de trois (03) bassins hydrographiques dont celui de :

- la Gambie ;
- la Rivière Niokolo-koba (la principale source d'eau du permis Kanoumba) ; et
- la Falémé.



- Figure 10 : Carte du réseau hydrographique dans notre zone d'étude



Photos 5A et 5B : aperçus saisonniers d'un affluent du Niokolo (X : 811372 Y : 1436352), Septembre 2016 (5A) et Mars 2017 (5B) (Crédit photo : Digby, 2018)

2.3.1.1. Gambie

L'un des grands fleuves de l'Afrique occidentale, prend sa source à Horé Dima ; à une douzaine de Kilomètre au Nord de Labé en plein cœur du Fouta Dialon (Daget, 1960). Elle arrose successivement les territoires de la Guinée, du Sénégal et de la Gambie. Son bassin versant s'étend, entre les latitudes 11°22' N, dans le Fouta-Djalou, et 14°40' N dans le Ferlo sud-oriental et entre les longitudes 11°13' W (Fouta-Djalou) et 16°42' W (Banjul, embouchure) en territoire gambien (Diop, 2019). Il (bassin versant) couvre une superficie de 77.054 km² dont 54.631 km² (70.9%) en territoire sénégalais. Le fleuve a une longueur de 485 km à l'intérieur du Sénégal sur un total de 1.150 km. Il draine de nombreux affluents dont la Koulountou, la Sandougou, le Diarha, le Niokolo Koba, le Niériko, la Sili, le Diaguiri et le Niaoulé.

Le débit moyen inter annuel (1970-2014) à Mako est de 99 m³/s, soit un volume d'eau de 2,8 milliards de m³. L'écoulement est caractérisé par une importante irrégularité interannuelle. En effet, le volume moyen annuel varie de 1,2 milliard de m³ à 4,7 milliards de m³ d'eau sur la période 1970-2014 (CSE, 2015) . En fonction du régime du fleuve, le bassin est divisé en :

- **bassin continental**, en amont de la station de Gouloumbou, à la frontière entre le Sénégal et la Gambie. Ce bassin est hors de l'influence maritime abrite la zone d'étude ;
- **bassin maritime**, en aval de Gouloumbou, fortement influencé par la remontée de la marée qui se fait ressentir pendant la saison sèche jusqu'à Gouloumbou (CSE, 2015).

C'est ainsi que le bassin versant de la Gambie constitue le second plus grand fleuve du Sénégal de par sa taille et les quantités d'eau écoulées.

2.3.1.2. Niokolo-Koba

Long d'environ 203 km, la rivière Niokolo est un affluent du fleuve Gambie. Il traverse le parc national du même nom, à environs 70 km en aval, qui est un site du patrimoine mondial de (UNESCO). Son bassin couvre une superficie de 4732 km². Dans le permis Kanoumba, le sous

bassin de la Gambie bien qu'intermittent draine la plus grande superficie du permis. Ainsi, il constitue une importante source d'eau pour les populations en particulier celles du village aurifère de Tinkoto. Ce dernier constitue l'un des plus grands villages d'exploitation minière artisanale et à petite échelle d'or de la région de Kédougou. La rivière Niokolo-Koba conflue avec la Gambie aux environs de Simenti.

2.3.1.3. Falémé

Affluent du fleuve Sénégal, prend sa source à 800 m d'altitude au pied du Fouta Djallon. Son bassin versant se situe entre les latitudes 12°11' et 14°27' N et les longitudes 11°12' et 12°15' O. Il couvre une superficie de 28900 km², soit 10% de la superficie totale du bassin versant du fleuve Sénégal dont il constitue le dernier grand affluent, long de 625 km (Fig. 11). La station hydrométrique de Bakel représente la station-clef sur le fleuve Sénégal. Elle est considérée comme la station de référence du fleuve Sénégal car étant située à l'aval du dernier affluent important, la Falémé. Le débit moyen interannuel à Bakel, sur la période 1950-2014, s'élève à 600 m³/s, soit un volume d'eau annuel de 18 milliards de m³ (CSE, 2015).

Le bassin de la Falémé est à cheval sur les trois pays :

- Mali (pour 13800 km², soit 47,8%) ;
- Sénégal (pour 11500 km², soit 39,7%) ; et
- Guinée Conakry (pour 3600 km², soit 12,5%).

Les travaux de Faye (2017) montrent que la délimitation du bassin de la Falémé avec le caractère contrasté du micro-relief du bassin reste délicate à cause de la complexité du maillage hydrographique des différents affluents du cours d'eau principal.

Dans la zone d'étude, une faible superficie vers le nord et le nord-est est drainée par la Falémé aux environs du village Mandinkhole, notamment ses affluents le Boboti et le Dialé en rive gauche.

2.3.1.4. Hydrogéologie de la zone d'étude

En zone de socle, plusieurs travaux notamment Diouf (1999), Lachassagne et Wyns (2005), Willeumier et al (2010), (Babaye 2012).et Mall (2009 et 2017) ont montré que les aquifères de socle sont localisés dans les horizons fracturés et fissurés des formations cristallines et cristalloyphylles ou dans leurs produits d'altération. Autrement dit, qu'en zone de socle, il n'y a pas d'aquifère généralisé, mais un réseau d'aquifères juxtaposés. Ces derniers sont souvent en contact les uns avec les autres et présentent des caractéristiques communes. D'après ces auteurs, à l'état actuel des connaissances, un système aquifère en domaine de socle cristallin et cristalloyphyllien est à la fois un réservoir capable d'emmagasiner de l'eau provenant des

pluies infiltrées, et un système conducteur permettant à cette eau de s'écouler en profondeur et de vidanger progressivement ce réservoir vers ses exutoires naturels que sont les rivières. Cependant, les aquifères du socle sont peu importantes et peu productives avec des potentialités estimées à 3,6 millions de m³/an avec des débits inférieurs ou égaux à 5 m³/ heure. Les travaux de (Tropica, 2006 *in* Diop, 2019) effectués dans la zone de socle du Sénégal ont montré que ces aquifères sont très temporaires avec des puits qui tarissent dès le mois de Mars, c'est-à-dire à trois mois de la saison pluvieuse dans les villages de Sabodala, Falombo, Mamakhono, etc. Cette nappe discontinue est captée par des forages au marteau fond de trou entre 30 et 70 m. La profondeur des puits villageois, quant à elle, varie entre 4 et 18 mètres. En domaine de socle cristallin et cristallophylien, le modèle proposé par (Lachassagne et Wyns, 2005) présente trois types de réservoirs aux caractéristiques physiques et hydrogéologiques différentes : le réservoir supérieur d'altérites, les réservoirs de fissures et les réservoirs de failles ou de fractures majeures (fig.11).

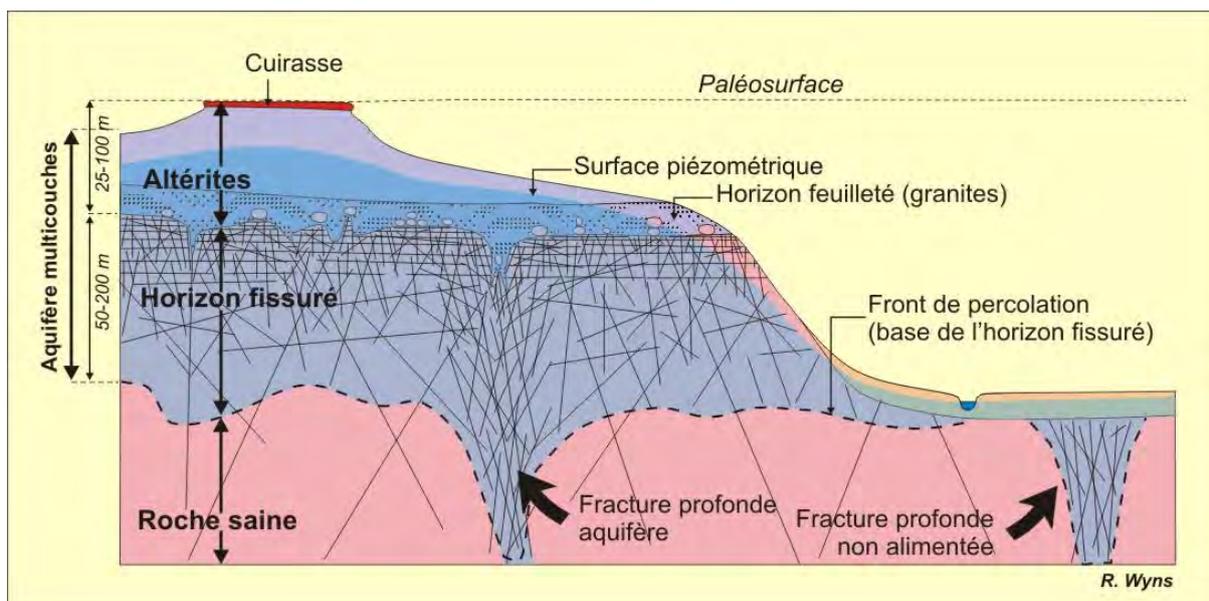


Figure 11 : Modèle de réservoir bicouche en domaine de socle (Lachassagne et Wyns, 2005)

2.3.1.5. Réservoir supérieur d'altérites

En zone de socle, l'altération se fait sous l'action de phénomènes physico-chimiques dont les facteurs essentiels sont la pluviométrie et la température. En effet, sous l'action du climat tropical, caractérisé par des températures élevées et l'alternance d'une saison sèche et d'une saison humide, les roches éruptives et les roches métamorphiques subissent une altération météorique qui les transforme en un complexe plus ou moins hétérogène de sables et d'argiles, d'épaisseur variable au-dessus du socle sain (Orange, 1990, *in* Mall, 2017). Ce dernier est recouvert, d'un manteau d'altération quasi continu dont l'épaisseur atteint couramment plusieurs dizaines de mètres. Cependant, la désintégration et l'altération des roches de socle

sont rendues possibles grâce au pouvoir de pénétration de l'eau, favorisé par la fracturation. Les produits d'altération du socle sont communément appelés « altérites » ; terme général qui couvre tous les horizons des formations altérées meubles. Les roches de socle lorsqu'elles sont altérées peuvent contenir des réserves importantes en eau souterraine. Ainsi, l'ensemble des altérites contient une « nappe unique » exploitable à différents niveaux.

2.3.1.6. Réservoir de fissures

La fissuration est un phénomène général dans le socle, elle peut affecter les terrains sur des épaisseurs variables en fonction de l'importance de la couverture altérée et de la tectonique locale. Ces fissures sont des micros-fractures constituées de joints et de diaclases diverses qui emmagasinent l'eau. Les études et travaux effectués au cours de ces dernières années au Burkina et en Côte d'Ivoire ont montré clairement que les terrains métamorphiques et cristallins présentent presque tous, une frange superficielle dans laquelle des fissures décomprimées forment de bons aquifères lorsque les conditions topographiques sont favorables (CEFIGRE, 1990 *in* Mall, 2017).

2.3.1.7. Réservoirs de failles ou de fractures majeures

En dehors des réservoirs d'altérites et de fissures, en zone de socle, il existe des réservoirs de failles ou de fractures majeures liés aux discontinuités affectant la roche. Selon Mall (2017) ces discontinuités (failles, joints, zones de cisaillement) constituent donc les principales voies d'écoulement des eaux dans les roches fracturées. Du point de vue hydrogéologique, ces fractures et discontinuités constituent les structures géologiques les plus importantes dans la circulation et le stockage des eaux en milieu de socle.

2.4. Conclusion partielle

La caractérisation géologique, hydrogéologique et hydrologique du permis Kanoumba, a permis de connaître que la zone d'étude est marquée chevelu hydrographique assez dense pour les eaux de surface et une absence d'aquifères généralisés pour les eaux souterraines. Cependant, si l'accès des eaux de surface paraît facile durant la saison des pluies, il n'en est pas de même durant la saison sèche à cause du caractère saisonnier d'une bonne partie des cours d'eau rencontrés dans la zone d'étude. Alors que pour les ressources en eaux souterraines, la productivité des terrains cristallins est faible.

Ainsi en zone de socle, nous pouvons conclure que la recherche d'eau souterraine se fonde essentiellement sur la recherche de :

- structures résultant principalement de phénomènes tectoniques ; et
- la zone altérée, aussi appelée saprolite ou regolith.

CHAPITRE 3 : MATERIEL ET METHODES

Dans ce chapitre, nous exposons le matériel et la démarche méthodologique utilisés afin d'évaluer la qualité des eaux souterraines et de surface présentes dans le permis Kanoumba. En effet, l'observation directe effectuée sur le terrain nous a permis de connaître que ces eaux sont utilisées par les communautés locales à de multiples fins et sans pré-traitement. Pour ce faire, la démarche méthodologique adoptée combine :

- **Une recherche bibliographique** qui a été effectuée durant toute la durée de l'étude.
- **Une phase de prospection**, effectuée en Mars 2018, a servi dans un premier temps de nous familiariser avec le terrain et de cartographier les composantes environnementales pouvant affecter la qualité des ressources en eaux dans le permis Kanoumba. Ici, les composantes environnementales les plus pertinentes prises sont les terres de culture et les sites d'exploitation minière artisanale et à petite échelle d'or. Elle a également servi à identifier l'ensemble des stations de collecte présentes dans le permis Kanoumba et la prise de coordonnées géographiques de ces stations.

Dans cette phase, l'**observation directe** sur le terrain a été un outil indispensable pour le choix de ces stations.

- **Une phase de collecte de données**. Elle a permis d'effectuer une campagne d'échantillonnage saisonnier réalisée en Avril (période de basses eaux) et en Août 2018 (période de hautes eaux). Cette phase a également servi au conditionnement, à la conservation des échantillons prélevés et au téléchargement d'images satellitaire.
- **Une phase de traitement des données**.

Elle a permis d'une part d'extraire le réseau hydrographique de la zone d'étude à partir des images satellitaire et d'autre part de traiter les résultats d'analyses des échantillons prélevés durant les campagnes d'échantillonnage effectuées en Avril et en Août 2018 afin d'évaluer la qualité des eaux souterraines et de surface dans la zone d'étude.

3.1.Phase de prospection

3.1.1. Stations d'échantillonnage

La compagnie RRL a implanté depuis plus d'une dizaine d'années plusieurs ouvrages hydrauliques (piézomètres, forages à motricité humaine, puits) dans son permis Kanoumba pour assurer en continu le bon déroulement de ses activités et l'AEP des communautés. Dans cette étude, nous avons utilisé des forages et puits situés au niveau des villages qui fournissent l'eau destinée à la consommation humaine. Nous avons également utilisé des piézomètres situés dans les zones minéralisées (sofia, Massawa et Delya) qui servent à la surveillance environnementale

pour RRL. En raison de l'implantation des piézomètres de Delya en Mai 2018, les deux ouvrages choisis dans ce secteur n'ont pu être étudié qu'en Août. Pour les eaux de surface nous avons utilisé les mêmes stations de collecte que celles de la compagnie. Ces stations ont été définies par le bureau d'études sud-africain Digby Wells et servent à la surveillance environnementale pour RRL.

3.1.2. Réseau d'échantillonnage

Les stations de prélèvements, sélectionnées d'une façon précise et bien répartie dans le permis Kanoumba, sont au nombre de vingt-deux stations réparties en :

- quatorze stations de prélèvement pour les eaux souterraines ; et
- huit stations pour les eaux de surface.

En fonction des catégories nous avons des ouvrages captant les eaux souterraines constitués :

- un (01) puits (MGW 07) ;
- six (06) piézomètres dans les zones minéralisées ; et
- sept forages villageois qui fournissent de l'eau pour la consommation humaine.

Les ouvrages hydrauliques (puits, forages et piézomètres) sont répartis comme suit :

- deux (02) au niveau du camp de Massawa MGW 02 et MGW 17 ;
- deux (02) au niveau du Village de Kanouméring MGW 03 et MGW 04 ;
- deux (02) au niveau du village de Mandinkhole MGW 05 et MGW 06 ;
- deux (02) au niveau du village de Tinkoto MGW 07 et MGW 19 ;
- deux (02) au niveau de la zone minéralisée de Sofia SMBH01, SMBH02 ;
- deux (02) au niveau de la zone minéralisée de Delya DDW01 et DDW02 ;
- deux (02) au niveau de la zone minéralisée de Centrale zone MDW01 et MDW03.

Concernant les eaux de surface, les stations de prélèvement retenues sont réparties comme suit :

- Quatre stations sur le Bassin du Niokolo qui occupe la plus importante superficie du permis Kanoumba ;
- Deux stations sur la rivière de Tinkoto qui est l'un des plus grands villages d'exploitation artisanale d'or ;
- Un point à Mako sur le bassin de la Gambie ; et
- Un point sur le Bassin de la Falémé situé à l'Est du Camp de Massawa

Le Tableau 2 en annexe et la figure 12 montrent leur emplacement exact dans le permis Kanoumba, établie grâce au logiciel Arc Gis 10.5 après prise des coordonnées au GPS (Global Positioning system) sur le terrain.

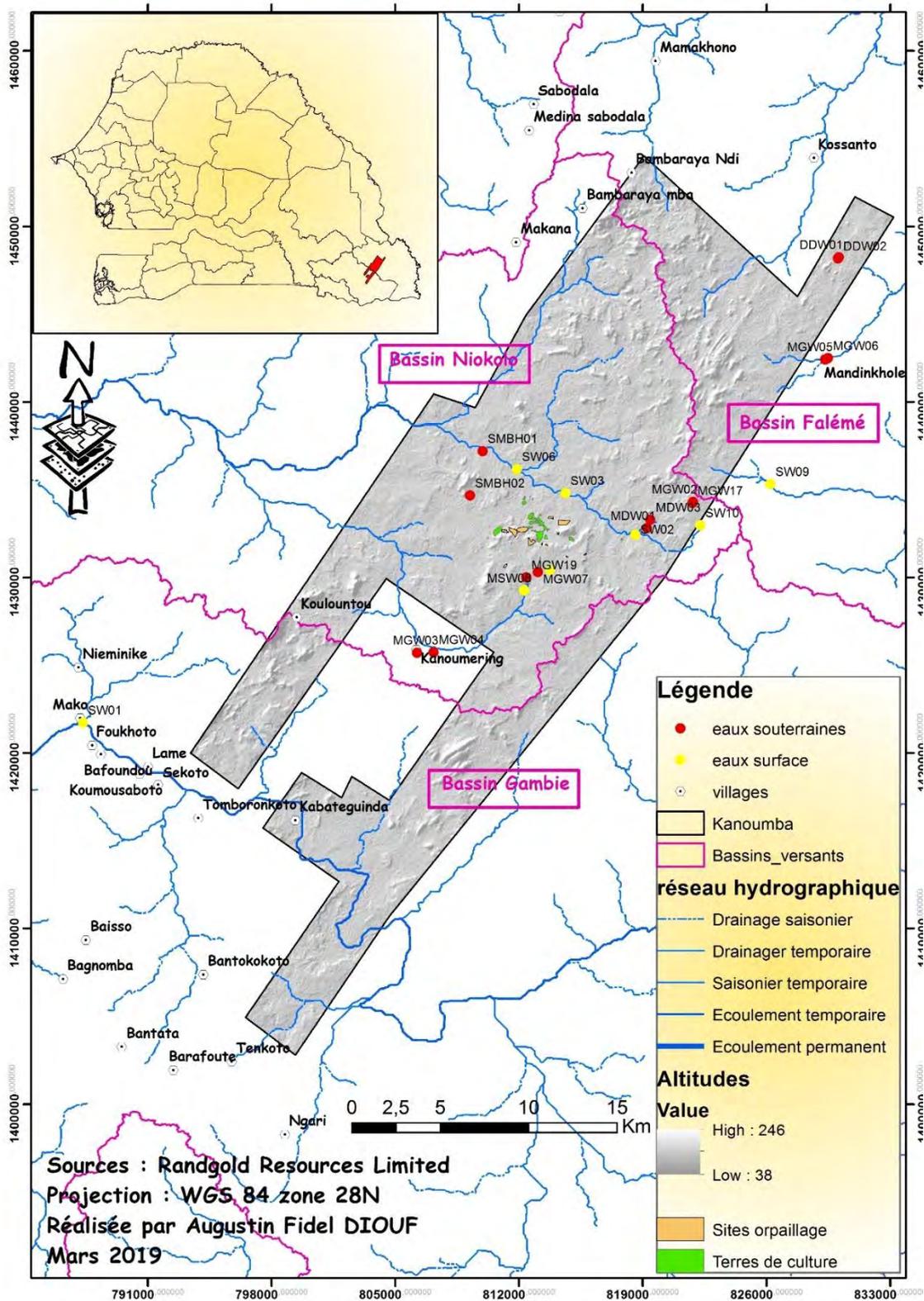


Figure 12 : Carte de localisation des sites de prélèvement dans le permis Kanoumba

3.2. Phase de collecte de données

3.2.1. Echantillonnage

3.2.1.1. Matériel d'échantillonnage

Le matériel de terrain nécessaire pour cette partie de l'étude est constitué de Pompe Waterra, d'une corde, une sonde piézométrique (pour connaître le niveau statique de l'eau), d'un ruban métrique, des marqueurs, d'un carnet de note, crayon, des bouteilles en nalgène, des glacières, des ice-packs pour la conservation des échantillons à une température de 4°C, un GPS et un appareil photo. L'appareil photo et le GPS jouent un rôle fondamental car permettent de compléter les informations directes sur le terrain à partir des observations effectuées sur chaque point échantillonné. Cependant, une partie du matériel qui a servi à la collecte des échantillons est préparée (lavé ; rincé et parfois acidifié) et fournie par le labo SGS au Mali. Il s'agit essentiellement des bouteilles en plastique nalgène, de l'eau distillée, des glacières.

Pour la collecte, trois (03) catégories de bouteilles en plastique nalgène ont été utilisées :

- une bouteille de 250 mL contenant de l'acide nitrique (HNO₃) comme agent de conservation pour permettre le dosage des éléments traces métalliques (Hg, As, Pb, Sb, Cu, Fe, Al, Cr, Pb, Zn) ;
- une bouteille de 1 litre pour les paramètres chimiques tels que les éléments majeurs cationiques (Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, K⁺) et anioniques (HCO₃⁻, SO₄⁻, Cl⁻, NO₃⁻) ; et
- une bouteille de 500 mL pour les paramètres physico-chimiques tels que (le pH, la conductivité, la turbidité).

3.2.1.2. Méthodologie d'échantillonnage

Afin d'évaluer la qualité des eaux souterraines et de surface dans le permis Kanoumba, un échantillonnage saisonnier a été réalisé durant l'année 2018. Une campagne de prélèvement est effectuée en Avril (correspondant à la période de basses eaux) et une autre campagne de prélèvement effectuée en Août (correspondant à la période de hautes eaux). L'objectif de l'échantillonnage est de prélever un volume d'eau suffisamment représentatif pour que son analyse démontre les caractéristiques de l'échantillon prélevé. Ce dernier doit être manipulé de manière à ce que sa composition ne soit pas modifiée pendant le transport et toutes les précautions possibles doivent être prises afin d'éliminer la contamination ou un changement de composition de l'échantillon causé par la température ou les manipulations inadéquates. Par exemple, le prélèvement au niveau du puits se fait par puisage direct et remplissage des bouteilles. Au niveau des forages, la collecte se fait après trois (03) minutes de pompage. Le prélèvement au niveau des piézomètres se fait après trois (03) minutes de purgeage de la nappe.

Pour la collecte des eaux de surface, aucun véhicule ne doit être garé à moins de 100m du cours de même la station de prélèvement ne doit pas se trouver à un niveau où l'eau est stationnaire. Les photos 6A, 6B, 6C et 6D donnent un aperçu de l'échantillonnage.



Photos 6A, 6B, 6C et 6D : aperçus de l'échantillonnage des ouvrages hydrauliques, échantillonnage eaux de surface (6A), échantillonnage forage (6B), purgeage forage (6C) et purgeage piézomètre (6D) (Crédit photo : Diouf, 2018)

3.2.2. Conditionnement et Conservation des échantillons

Le conditionnement des échantillons se fait directement sur le terrain. Ici, il est attribué à chaque échantillon un numéro. Ces données sont reportées dans la base de données dès retour au bureau. Après prélèvement et conditionnement, les échantillons sont conservés dans des glacières afin de les stabiliser à une température inférieure 04°C et doivent parvenir au laboratoire SGS à Bamako (au Mali) idéalement dans les 24H qui suivent. Les photos 6A et 6B donnent un aperçu sur le conditionnement et la conservation des échantillons.

3.2.3. Contrôle qualité de l'échantillonnage

Un échantillon de référence dont les paramètres sont connus par avance est conditionné et associé aux différents échantillons qui sont envoyés au laboratoire afin de vérifier la fiabilité des résultats. Cet échantillon de référence est nécessaire pour que l'interprétation des résultats du contrôle soit scientifiquement valable. Il peut aussi être un duplicata c'est-à-dire un échantillon prélevé et subdivisé en deux parties dont chacune est analysée simultanément dans le même lot d'analyses.



Photos 7A et 7B : aperçus sur la préparation des échantillons, conditionnement des échantillons (7A), conservation des échantillons (7B) (Crédit photo : Diouf, 2018)

3.2.4. Paramètres étudiés

La qualité d'une eau naturelle se définit par sa composition physique, chimique, biotique ou organoleptique, à servir à un usage défini ou à permettre le fonctionnement d'un milieu aquatique donné (Tarits et *al.*, 2002). Les solutions naturelles ne sont jamais pures. Elles contiennent des particules de toutes tailles, comme les ions dissouts, les colloïdes, les macromolécules organiques, les bactéries, les virus, etc. Ces particules appartiennent aux différentes enveloppes terrestres (biosphère, atmosphère, géosphère) ou peuvent être la conséquence des effets de la technologie sur l'environnement (pollution). Notre étude porte essentiellement sur les paramètres physiques et chimiques des eaux souterraines et de surface situées dans le permis Kanoumba.

- **Paramètres physico-chimiques** concernent la Turbidité, le pH et la Conductivité électrique.
- **Paramètres chimiques** concernent les éléments majeurs et les éléments traces métalliques.

- **Eléments majeurs** sont des éléments cationiques tels que (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+) et anioniques (HCO_3^- , SO_4^- , Cl^- , NO_3^-). Selon (Tarits, 2002), ces éléments qui représentent environ 95 % des solides totaux dissous renseignent sur la minéralisation et les origines souterraines des eaux.
- **Eléments traces métalliques (ETM)**

L'expression « métal lourd » désigne des métaux de numéros atomiques élevés, de densité supérieure ou égale à 5 g.cm^{-3} et qui forment des sulfures insolubles. Ils sont généralement retrouvés en très faible quantité dans l'environnement d'où l'appellation d'éléments traces (Mombo, 2016). Dans ce travail, les ETM étudiés sont Cu, Zn, Fe, Al, Cr, As, Sb ; Pb, Hg.

Les paramètres étudiés, les unités, les limites de détection et les méthodes d'analyse physico-chimiques et chimiques, réalisées sur les échantillons d'eau prélevés sont mentionnés dans le tableau 3 (en annexe).

3.2.5. Acquisition des images et données cartographiques

Dans cette étude, les Shape files obtenus à travers la base de données environnement de RRL résultant de la cartographie des terres de cultures et des sites d'exploitation minière artisanale et à petite échelle d'or localisés dans le permis Kanoumba ont été utilisés en Mars 2019. En effet, dans le cadre de la surveillance environnementale de RRL, une place très importante est réservée à l'actualisation des données sur l'évolution des activités culturelles et d'exploitation minière artisanale et à petite échelle d'or effectuées par les communautés locales dans le permis Kanoumba.

Outre les données cartographiques, les images de Alos palsar de 2011 ont été utilisées dans cette étude. Il s'agit d'images à haute résolution (12.5m de résolution) téléchargeable directement à partir de Alaska satellite facility. PALSAR possède des fonctions et des performances avancées du radar à synthèse d'ouverture à bord du premier satellite japonais de ressources terrestres (JERS-1). Il s'agit d'un capteur actif à hyperfréquences qui capte l'image de la Terre jour et nuit, quelles que soient les conditions atmosphériques. PALSAR est un effort de développement conjoint entre l'Agence japonaise d'exploration aérospatiale (JAXA) et le Japan Resources Observation System And Space Utilization Organization (JAROS).

3.3. Phase de traitement des données

3.3.1. Outils de traitement des données

Afin d'analyser les données de terrain et les résultats d'analyse de laboratoire, plusieurs logiciels ont été utilisés. Ces derniers constituent des outils incontournables d'analyse, de traitement et de représentation des données de terrains et de résultats de laboratoire.

- le logiciel Microsoft Excel a été utilisé pour permettre et faciliter le traitement de données, effectuer les différents calculs et enfin établir des graphes ;
- le logiciel Microsoft Word a été utilisé pour rédiger le mémoire.
- le logiciel Arcgis 10.5 a été utilisé pour représenter sur carte les données ponctuelles de terrain ;
- le logiciel Diagramme a permis de faire le traitement des données hydrochimiques ;
- le logiciel Origin pro 2018 a été utilisé pour les traitements statistiques des données hydrochimiques ; et

En outre, les SIG ont été d'un grand apport à la réalisation de cette étude.

3.3.2. Qualité des analyses

Le traitement et l'interprétation des résultats des analyses des eaux nécessitent au préalable de vérifier leurs fiabilités. Pour ce faire, nous avons calculé la Balance Ionique (BI) pour chaque analyse. En effet, la Balance Ionique appelée aussi Neutralité Electrique (NE) est un paramètre de contrôle de la qualité d'une analyse chimique des éléments majeurs en solution dans l'eau. Elle provient du fait que les particules à charges positives présentes dans l'eau sont égales en quantité à celles à charges négatives. Elle est exprimée en % et on la calcule à partir des concentrations des éléments exprimés en Milliéquivalent/L. En effet, une eau naturelle étant théoriquement neutre, la somme de ses cations devrait être égale à la somme de ses anions. Mais dans la réalité, cette égalité est rarement obtenue, et l'écart relatif s'exprime par la formule

$$\text{de la BI. Avec } BI = \frac{\Sigma(\text{cations}) - \Sigma(\text{anions})}{\Sigma(\text{cations}) + \Sigma(\text{anions})} \times 100 \quad (2)$$

La qualité des analyses chimiques est considérée comme acceptable si elle est comprise entre -7 et +7% (Tarits et *al.*, 2002). Généralement les fortes valeurs de BI sont attribuées à d'éventuelles erreurs d'analyse au laboratoire, ou à la présence dans l'eau, de certains ions n'ayant pas été pris en compte dans l'analyse. Ce contrôle de la qualité des analyses qui doit être réalisé avant tout calcul, valide l'interprétation des données. Le signe +/- qui précède la valeur de BI, permet de comparer la quantité totale des anions avec celle des cations. Par exemple, le signe « - » indique que la somme des anions est supérieure à celle des cations.

3.3.3. Traitement des images et données cartographiques

Le réseau hydrographique a été obtenu à partir d'images radar Alos Palsar. Il s'agit d'images à haute résolution (12.5m de résolution). Le traitement de ces images s'est fait à partir du logiciel Arc GIS 10.5. Ensuite, elles sont ensuite assemblées et mosaïquées dans le système de coordonnées géographique WGS 84. Après assemblage l'image est exportée dans le logiciel Arc GIS 10.5 pour une classification des caractéristiques contenues dans l'image. Ainsi à partir

du modèle numérique de terrain (MNT), nous avons pu réaliser la carte de distribution du réseau hydrographique (fig.10), les cartes de répartition des altitudes (fig. 6) et des pentes (fig.7).

3.4.Conclusion partielle

Ce chapitre nous a essentiellement permis d'expliquer le matériel et les méthodes de travail utilisés afin d'évaluer la qualité des ressources en eaux souterraines et de surface dans la zone d'étude. Les travaux de terrain réalisés ont porté sur deux campagnes d'échantillonnage effectuées durant les mois d'Avril et d'Août 2018. Ce qui nous a permis de cadrer notre réseau d'échantillonnage, choisir les stations de prélèvement, décrire le matériel et les méthodes d'échantillonnage ainsi que le conditionnement et la conservation des échantillons prélevés.

Il nous a également permis d'expliquer les méthodes d'acquisition des images satellitaires et des données cartographiques. Le traitement des données a nécessité l'utilisation de plusieurs outils et méthodes de traitements des données.

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. Introduction

Ce présent chapitre est essentiellement consacré à l'analyse et à la discussion des résultats d'analyse sur la qualité des ressources en eaux souterraines et de surface échantillonnées durant les campagnes de prélèvement effectuées en Avril et en Août de l'année 2018. En effet, l'évaluation de la qualité chimique de l'eau de boisson se fonde sur la comparaison entre les résultats de l'analyse qualitative de l'eau et des valeurs guides. Pour cela les résultats d'analyses des eaux souterraines échantillonnées sont comparés aux valeurs guides de l'OMS (2017) relative à la potabilité de l'eau de boisson. Pour les eaux de surface, les résultats d'analyses obtenus sont comparés avec les critères du Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement (CCME, 2008).

4.2. Evaluation de la qualité des ressources en eau

4.2.1. Eaux souterraines

4.2.1.1 Caractérisation physico-chimique

- pH

Le pH est un paramètre qui renseigne l'acidité, la neutralité ou l'alcalinité d'une eau. Dans le permis Kanoumba les valeurs de pH obtenues aussi bien en Avril qu'en Août 2018 indiquent que les eaux souterraines sont légèrement acides à neutres. En effet, ces valeurs varient de 6,3 à 7,6 avec une valeur médiane de 7,05 en Avril alors qu'en Août elles varient de 6,1 à 8,3 avec une valeur médiane de 7 (fig. 13).

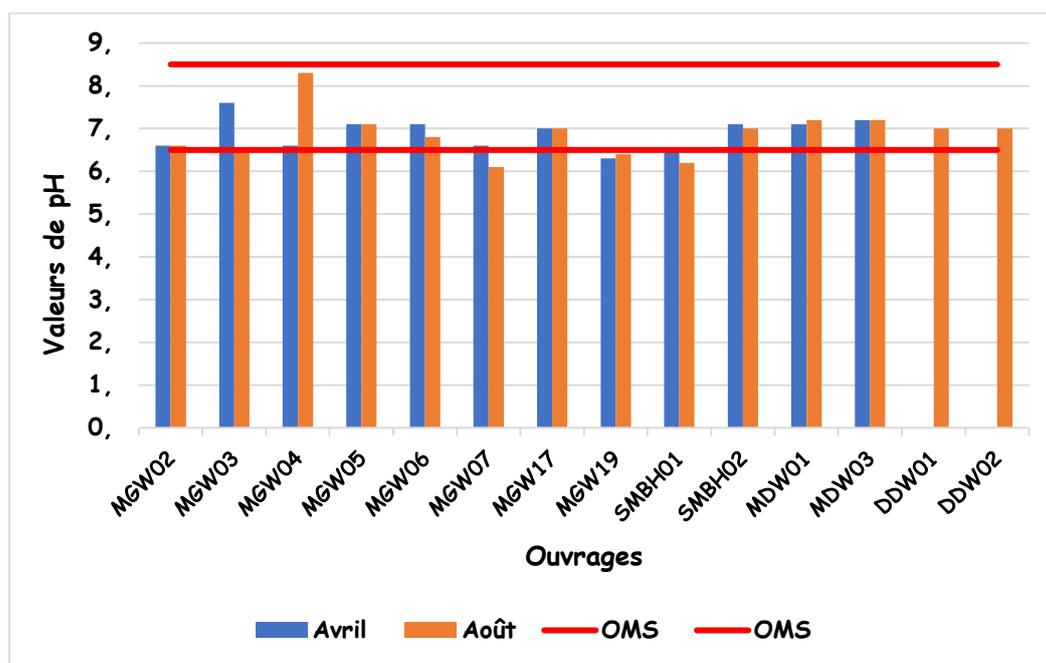


Figure 13 : Valeurs de pH des eaux souterraines échantillonnées

Cette tendance à la neutralité dans les aquifères profonds pourrait être due à la consommation du CO₂ suite à l'hydrolyse des silicates entraînant l'augmentation de l'alcalinité (HCO₃⁻) des eaux (Schoeller, 1962 ; Faillat et Drogue, 1993 ; in Babaye, 2012). En effet les ouvrages qui captent les formations acides comme les granites ont un caractère relativement acide, c'est le cas des ouvrages de Tinkoto MGW07 (6,1 en Avril) et MGW19 (6,3 en Avril et 6,4 en Août).

❖ Conductivité Electrique (CE)

La conductivité électrique désigne la capacité de l'eau à conduire un courant électrique. Dans le permis Kanoumba, les valeurs de la conductivité électrique des eaux échantillonnées sont très hétérogènes. Elles varient de 109 à 740 µS/cm pour une médiane de 364 µS/cm en Avril alors qu'en Août elles varient de 93 à 761 µS/cm avec une médiane de 370 µS/cm (fig. 14).

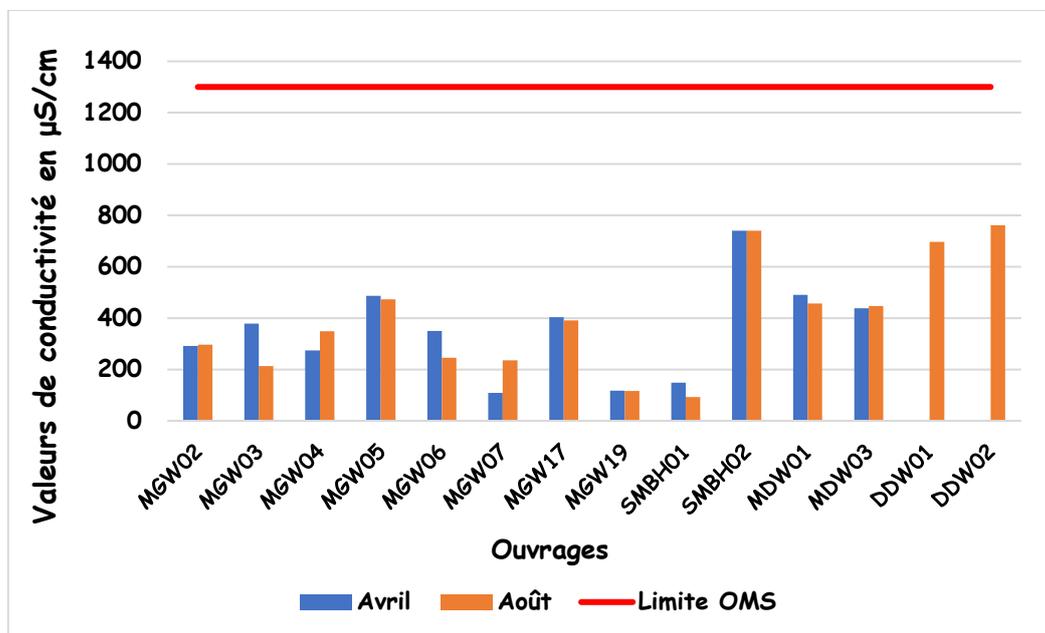


Figure 14 : Valeurs de CE des eaux souterraines échantillonnées

En Avril comme en Août, les plus faibles valeurs de conductivités électriques sont enregistrées par les ouvrages situés dans le village de Tinkoto. Les plus fortes valeurs sont enregistrées pour les ouvrages situés dans les zones minéralisées, avec les maxima dans le secteur de Delya. La baisse de la minéralisation dans quelques ouvrages durant la saison des pluies pourrait être liée à la dilution qui se produit dans les zones de recharges. En revanche, l'augmentation de la minéralisation observée au niveau du puit MGW07 de Tinkoto durant la saison des pluies pourrait être due à l'apport de l'ion NO₃⁻ par les eaux d'infiltration. Les résultats obtenus corroborent avec ceux de Mall (2009 et 2017) et Diop (2019), qui ont montré que dans la zone d'étude, les eaux des terrains granitiques (cas de Tinkoto) sont moins minéralisées que les eaux des formations volcano-sédimentaires et des schistes (cas du secteur de Delya).

En comparant, ces valeurs de concentrations avec la valeur guide l'OMS pour l'eau de boisson fixée à 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, nous pouvons en conclure que les eaux souterraines du permis Kanoumba sont des eaux douces.

❖ Turbidité

La turbidité, généralement exprimée en unités de turbidité néphélométriques (UTN), décrit le caractère trouble de l'eau provoqué par des particules en suspension (l'argile et les limons), des précipités chimiques (le manganèse et le fer), des particules organiques (débris de plantes) et des organismes (OMS, 2017). A l'échelle du secteur de Kanoumba, la turbidité des eaux est très variable. Elles varient de 0,2 à 20,3 NTU avec une valeur médiane de 0,5 NTU et de 0,2 à 151 NTU avec une valeur médiane de 3,25 NTU (fig. 15).

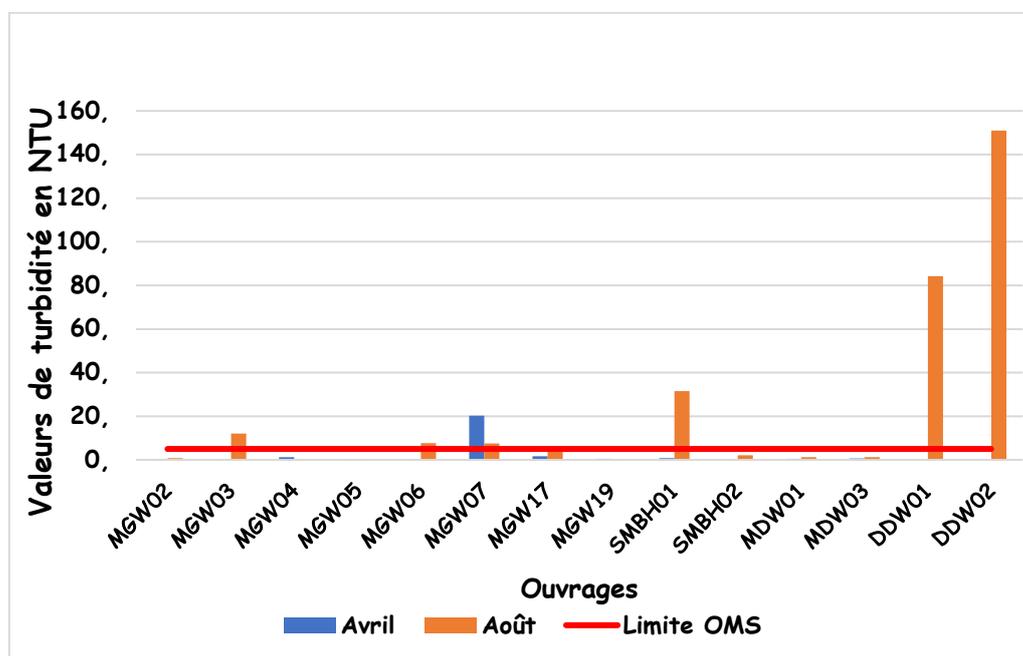


Figure 15 : Valeurs turbidité des eaux souterraines échantillonnées

En Août, on constate des valeurs de Turbidité très variables allant de 0.2 à 151 NTU avec une valeur médiane de 3,25 NTU largement supérieure à celle obtenue en Avril. Les plus fortes valeurs de turbidité sont obtenues dans la zone minéralisée de Delya (avec des valeurs de 84,3 à 151 NTU). Ces valeurs élevées de turbidité enregistrées pour les ouvrages situés dans le secteur de Delya durant la période de hautes eaux pourraient être liées à un développement insuffisant des ouvrages récemment construits dans ce secteur mais aussi au phénomène de fissuration du socle qui facilitent l'infiltration et le transport des particules fines vers les aquifères de socle. Alors que pour la zone de Tinkoto, ces valeurs élevées de turbidité durant la période de hautes eaux peuvent être liées à la forte pluviométrie, aux activités agricoles, l'exploitation artisanale d'or notamment aux rejets miniers dans la zone mais aussi par les eaux de ruissellement qui par lessivage, transport et infiltration peuvent atteindre les aquifères de

sole (photo 7A et 7B). En comparaison avec la valeur guide de l'OMS sur la potabilité de l'eau de boisson fixée à 5NTU, nous pouvons dire que durant le mois d'Août les eaux issues des ouvrages (DDW02, DDW01, SMBH01, MGW03 et MGW06) présentent des valeurs de turbidité au-delà de la valeur guide de l'OMS fixée à 5 NTU avec respectivement comme valeurs (151 NTU ; 84,3 NTU ; 31,5 NTU ; 12 et 7,7 NTU). Seul le puits MGW07 présente des valeurs de turbidité supérieures au seuil de l'OMS aussi bien en Avril qu'en Août. En effet, la turbidité des eaux de ce puits peut résulter au fait que ce puits est peu profond et ne présente pas de couverture ni de margelle. Pour, les ouvrages ayant des valeurs supérieures au seuil de l'OMS, les populations doivent filtrer ou décanter l'eau avant toute utilisation comme eau de boisson.



Photos 8A et 8B : aperçus sur la turbidité des eaux de la rivière de Tinkoto, partie de la rivière située en amont des rejets miniers issus des activités d'orpaillage (8A), partie de la rivière située en aval des rejets miniers issus des activités d'orpaillage (8B) (Crédit photo : Diouf, 2018)

4.2.1.2 Caractérisation chimique

❖ Hydrochimie des eaux souterraines

L'hydrochimie étudie les processus chimiques qui affectent la distribution et la circulation des composés chimiques dans l'eau. Dans l'aquifère, il s'établit un équilibre entre la composition chimique de l'eau, celle des roches et les conditions physiques du milieu. L'eau acquiert alors une minéralisation et possède des propriétés physico-chimiques caractéristiques du milieu. La composition chimique d'une eau issue du milieu naturel est très variable. Elle dépend de la nature géologique des terrains d'où elle provient et aussi des substances réactives qu'elle aurait pu rencontrer lors de l'écoulement.

Le report des résultats des analyses des huit (08) ouvrages situés dans les villages de Tinkoto, Mandinkhole, Kanouméring et le Camp de Massawa sur le diagramme triangulaire de Piper (Fig 16 et fig. 17), permet de déterminer les différents faciès chimiques des eaux et d'estimer les pourcentages des éléments chimiques et leur classification. L'examen de ces diagrammes

montre globalement que la chimie des eaux souterraines situées dans le permis Kanoumba est caractérisée par trois (03) types de faciès :

- **un faciès bicarbonaté calcique magnésien ;**

Ces eaux montrent une diminution de la teneur en $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ qui égale celle des ions Ca^{++} ou Mg^{++} . Dans la zone de socle du Sénégal, ce faciès est le plus représenté quelque soit la nature du réservoir.

- **un faciès bicarbonaté sodique et potassique ; et**

Ces eaux montrent une forte proportion de Na^+ et K^+ par rapport à celle du Ca^{++} .

- **un faciès chloruré sodique et potassique.**

Ces eaux sont caractérisées par des concentrations en nitrates élevées.

Selon les saisons, le mois d'**Avril** est essentiellement caractérisé par le faciès bicarbonaté calcique magnésien pour l'ensemble des ouvrages étudiés alors qu'en **Août** le faciès bicarbonaté calcique magnésien domine largement. Le faciès bicarbonaté sodique et potassique est représenté par deux ouvrages à savoir MGW 05 de Mandinkhole et MGW 19 de Tinkoto. Un seul ouvrage représente le faciès chloruré sodique et potassique il s'agit du puits MGW 07 du village de Tinkoto. Ces résultats corroborent ceux de Ndong (2014) ayant travaillé dans la même zone d'étude mais aussi ceux d'autres auteurs ayant travaillaient dans le même environnement géologique (Diouf 1999 ; Mall 2009 et 2017 ; Diop, 2018). Ces derniers ont montré que les faciès bicarbonatés calciques magnésiens sont les plus représentés dans les eaux du Sénégal oriental aussi bien au niveau des nappes profondes que de nappes superficielles. Se référant aux travaux de Diop (2018), ce faciès est aussi en conformité avec la nature silicatée des terrains géologiques. D'après l'auteur, l'hydrolyse des roches volcaniques fortement présentes dans la zone qui sont essentiellement silicatées libère beaucoup de bicarbonates (HCO_3^-) et des alcalinoterreux Ca^{++} et Mg^{++} . Ceux-ci peuvent provenir de l'altération des minéraux ferromagnésiens constitutifs de ces roches réservoir que sont les péridots (olivines) et les pyroxènes. De plus, Diouf (1999) et Mall (2017) ont signalé la présence du faciès bicarbonaté sodique et potassique dans le secteur de Mandinkhole. Ces eaux montrent une forte proportion de Na^+ et K^+ par rapport à celle du Ca^{2+} . Par contre, le faciès chloruré sodique et potassique correspond au puits MGW 07 situé dans le village de Tinkoto. En effet, la prédominance des alcalins (Na^+ et K^+) dans les ouvrages MGW07 et MGW 19 situés dans le secteur de Tinkoto (formations acides) pourrait être liée à la nature géologique des terrains. D'après Diouf (1999), la teneur en Cl est nettement plus importante dans les eaux des altérites des granites que dans celle de la roche.

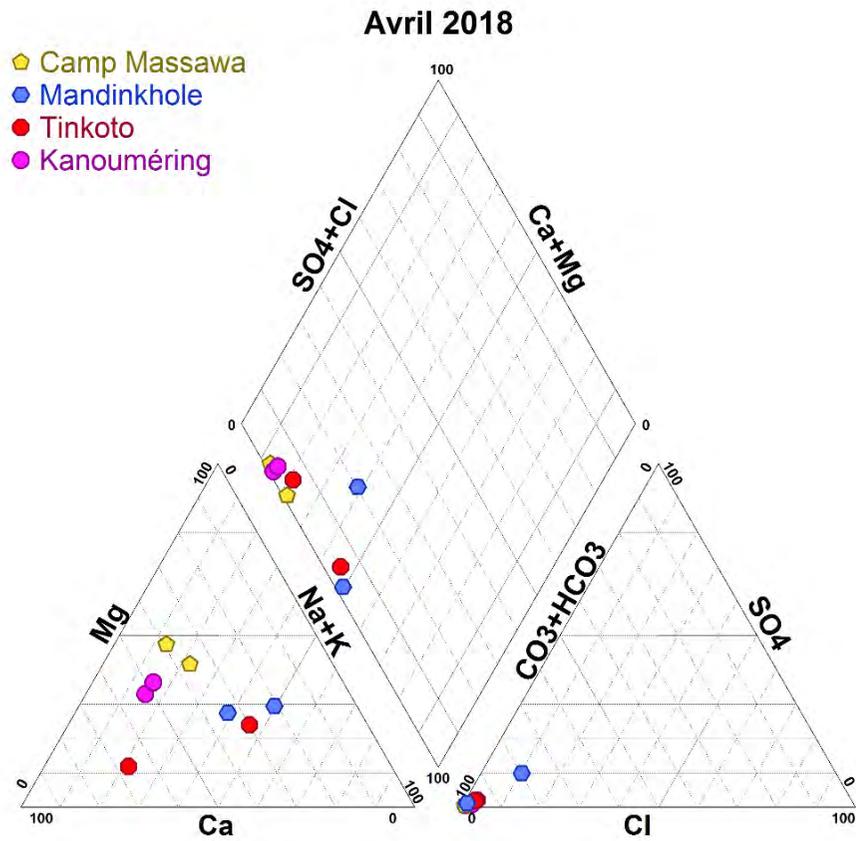


Figure 16 : Répartition des faciès chimiques des eaux sur diagramme de Piper (Campagne Avril 2018)

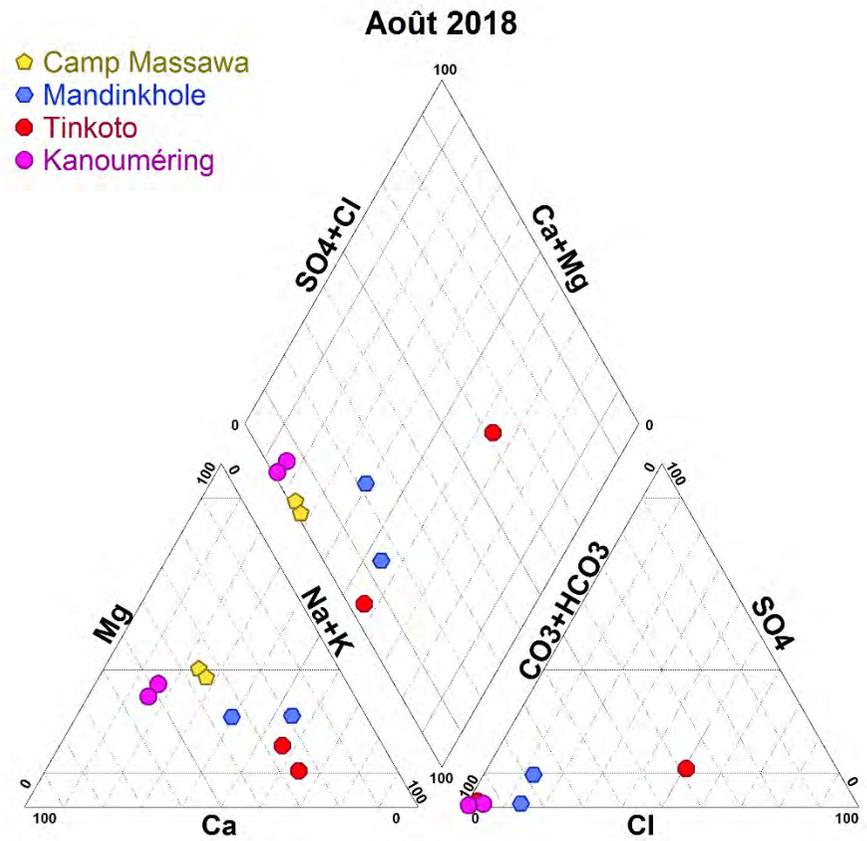


Figure 17 : Répartition des faciès chimiques des eaux sur diagramme de Piper (Campagne Août 2018)

Par ailleurs, la projection des résultats des analyses de tous les ouvrages hydrauliques (forages villageois, piézomètres et puits) effectués dans le permis Kanoumba durant les campagnes de prélèvements d'Avril et d'Aout 2018 sur le logiciel Origin pro (figure 18) donne une idée sur la répartition des concentrations des ions majeurs dans le permis Kanoumba. Globalement, chez ces ions majeurs, le bicarbonate constitue de loin l'anion dominant dans les eaux souterraines alors que pour les cations, le calcium, le magnésium et le sodium constituent les ions dominants pour l'ensemble des ouvrages étudiés aussi bien en Avril qu'en Août. Pour les ions chlorures, sulfates, potassium, et nitrates, la figure 18 montre de faibles concentrations. En conformité avec les résultats d'analyse des diagrammes de Piper (Avril et Aout), ces résultats montrent la prédominance des faciès bicarbonaté calcique magnésien, bicarbonaté sodique et potassique ; et dans une moindre mesure du faciès chloruré sodique et potassique. Ceci pourrait être lié à l'environnement géologique de la zone d'étude et donc au fond géochimique de l'aquifère de socle du permis Kanoumba. Ces résultats corroborent ceux d'autres auteurs ayant travaillé dans le même environnement géologique tels que Diop (2019), Mall (2017), Ndong (2014) et Diouf (1999).

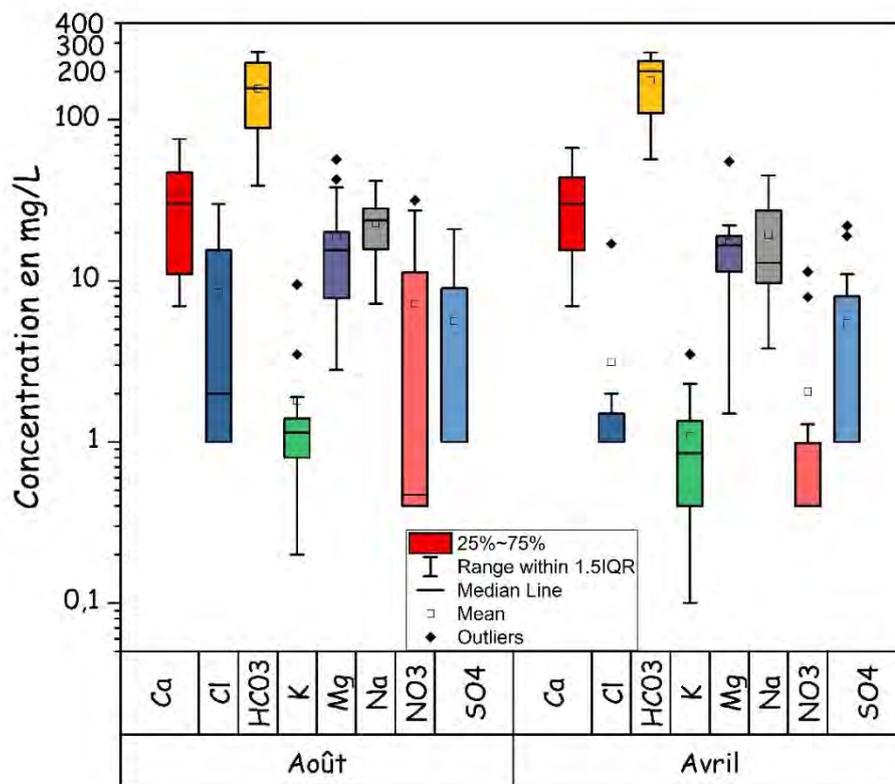


Figure 18 : Concentrations en mg/L des eaux souterraines en ions majeurs dans le permis Kanoumba

❖ Ions majeurs

▪ Calcium

La présence des ions Ca^{++} dans l'eau indique, soit une dissolution des minéraux carbonatés, calcite (CaCO_3), dolomite [$(\text{Ca},\text{Mg})\text{CO}_3$] ou bien la dissolution des formations évaporitiques, gypse [$\text{CaSO}_4, 2(\text{H}_2\text{O})$] et anhydrite (CaSO_4) (Saoud, 2014). Dans le contexte géologique du Sénégal oriental particulièrement de la zone d'étude, l'essentiel des ions Ca^{++} pourrait provenir de l'hydrolyse des minéraux silicatés tels que les plagioclases, les péridots, les minéraux ferromagnésiens. Les résultats des analyses montrent que les concentrations en Ca^{++} des eaux souterraines varient de 7 à 76 mg/L avec une valeur médiane de 30 mg/L en Août et de 7 à 67 mg/L avec une valeur médiane de 30 mg/L en Avril. Bien que le calcium soit parmi les cations dominant dans les eaux, les concentrations obtenues en Avril comme en Août sont largement inférieures à la valeur guide de l'OMS pour l'eau de boisson fixée à 100 mg/L (fig. 19).

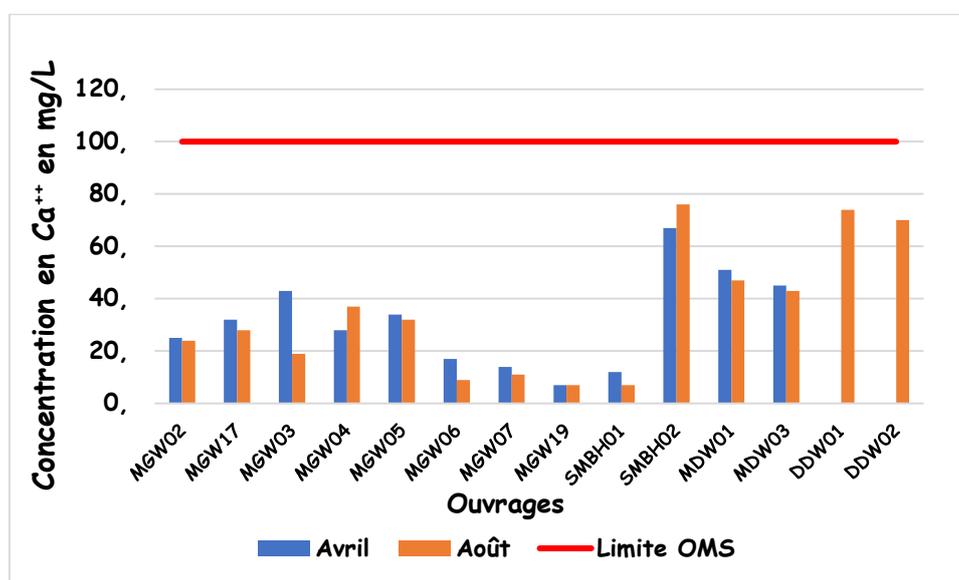


Figure 19 : Concentrations en Ca^{++} des eaux souterraines échantillonnées

▪ Chlorure

Généralement les teneurs en chlorure des eaux du permis Kanoumba sont très faibles. Les concentrations varient de 1 à 17 mg/L avec une valeur médiane de 1 mg/L et de 1 à 30 mg/L avec une valeur médiane de 30 mg/L en Août (fig. 20). En Avril comme en Août, les ouvrages situés dans le Camp de Massawa présentent les plus faibles concentrations en ions chlorure alors que les ouvrages situés dans le village Mandinkhole (MGW05 et MGW06) et le puits MGW07 de Tinkoto présentent les concentrations les plus élevées. Aucune valeur guide reposant sur des arguments sanitaires n'est proposée pour le chlorure dans l'eau de boisson. D'après les directives de l'OMS (2017), des concentrations supérieures à 250 mg/L seront

détectées par le goût par un nombre croissant de consommateurs mais certains d'entre eux peuvent s'habituer au goût conféré par de faibles concentrations de chlorure.

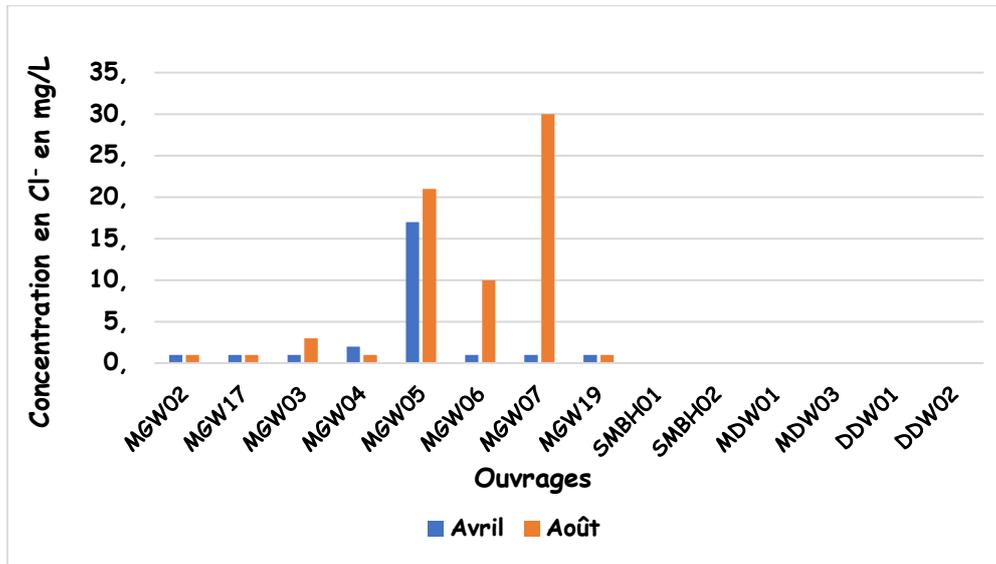


Figure 20 : Concentrations en Cl⁻ des eaux souterraines échantillonnées

▪ **Magnésium**

Les résultats obtenus montrent des teneurs en magnésium relativement importantes en Avril comme en Août. Les concentrations varient de 1,5 à 55,2 mg/L avec une valeur médiane de 16,6 mg/L en Avril et de 2,8 à 56,9 mg/L en Août avec une valeur médiane de 15,55 mg/L (fig. 21).

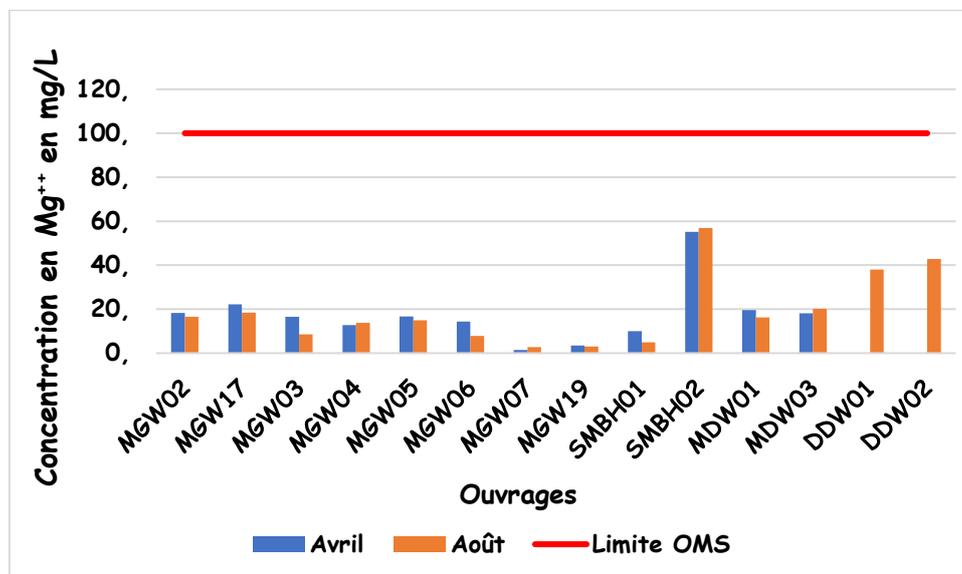


Figure 21 : Concentrations en Mg⁺⁺ des eaux souterraines échantillonnées

Tout comme le calcium, le magnésium constitue un cation dominant dans les eaux. Dans un contexte géologique similaire à celui de notre zone d'étude, des auteurs comme Babaye (2012),

Mall (2017) et Diop (2019) ont montré que ces alcalino-terreux (Mg^{++} et Ca^{++}) proviendraient en partie des roches volcaniques basiques qui prédominent dans la région notamment les basaltes et gabbros

▪ Sodium

D'après les directives de l'OMS (2017) pour l'eau de boisson, le seuil de concentration de sodium dans l'eau qui est détectable par le goût dépend de l'anion associé et de la température de la solution. À température ambiante, le seuil moyen de détection pour le sodium est d'environ 200 mg/L. Aucune valeur guide reposant sur des arguments sanitaires n'a été déterminée car la contribution de l'eau de boisson à l'ingestion journalière de sodium est faible. Dans le permis Kanoumba, l'ion sodium fait partie des cations dominants dans les eaux souterraines. Les résultats des analyses le confirment avec des valeurs qui varient de 3,8 et de 45,3 mg/L en Avril avec une valeur médiane de 15,47 mg/L et de 7,2 à 41,8 mg/L en Août avec une valeur médiane de 23,85 mg/L (fig. 22). Toutefois, ces valeurs sont inférieures au seuil moyen de détection pour le sodium.

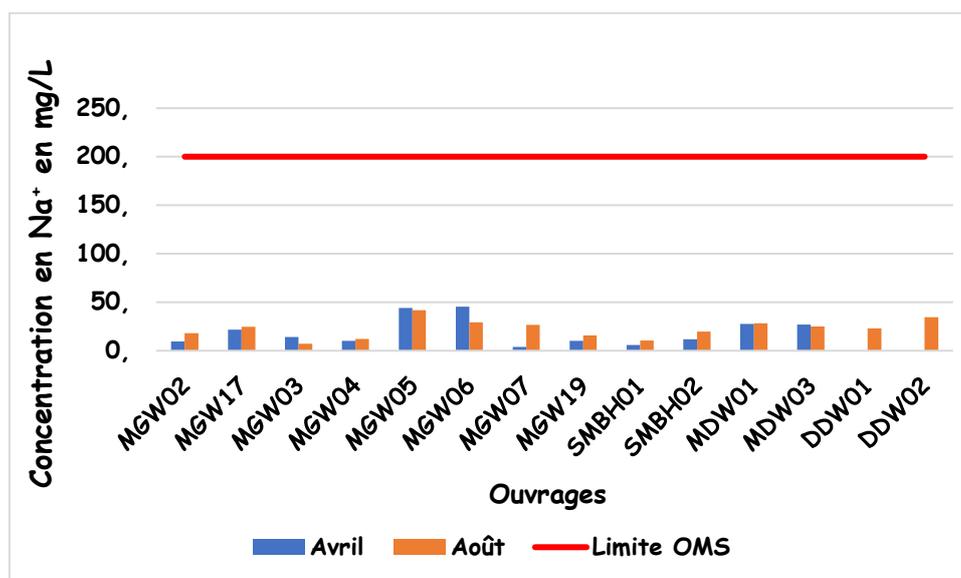


Figure 22 : Concentrations en Na^+ des eaux souterraines échantillonnées

▪ Potassium

D'après les directives de l'OMS (2017) pour l'eau destinée à la consommation humaine, le potassium est un élément essentiel pour l'homme et il est rarement, voire jamais, présent dans l'eau de boisson à des niveaux qui pourraient présenter un risque pour la santé humaine. L'apport quotidien recommandé est supérieur à 3000 mg. Le potassium est largement répandu dans l'environnement, notamment dans toutes les eaux naturelles. Cependant, les résultats obtenus montrent des concentrations en potassium faibles dans les eaux analysées en Avril et

Août. Ces concentrations varient de 0,1 à 3,5 mg/L avec une valeur médiane de 0,85 mg/L et de 0,2 à 9,5 mg/L avec une valeur médiane de 1,15 mg/L en Août (fig. 23).

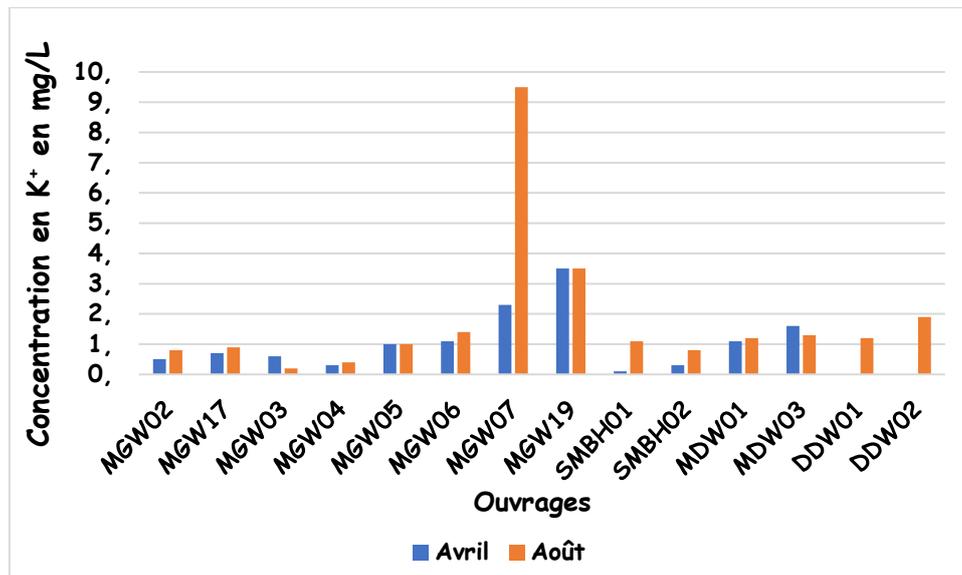


Figure 23 : Concentrations en K⁺ des eaux souterraines échantillonnées

▪ Bicarbonates

Ils constituent les ions les plus représentés dans les eaux souterraines du permis Kanoumba. D'après (Diouf, 1999), les carbonates peuvent provenir de l'atmosphère (gaz carbonique, méthane), des réactions chimiques avec la matière organique, ou bien peut avoir une origine profonde. Pour Mall (2017) et Diop (2019), dans un environnement géologique similaire, l'hydrolyse des terrains silicatés basiques fréquemment rencontrés est la principale source d'enrichissement des eaux en HCO₃⁻.

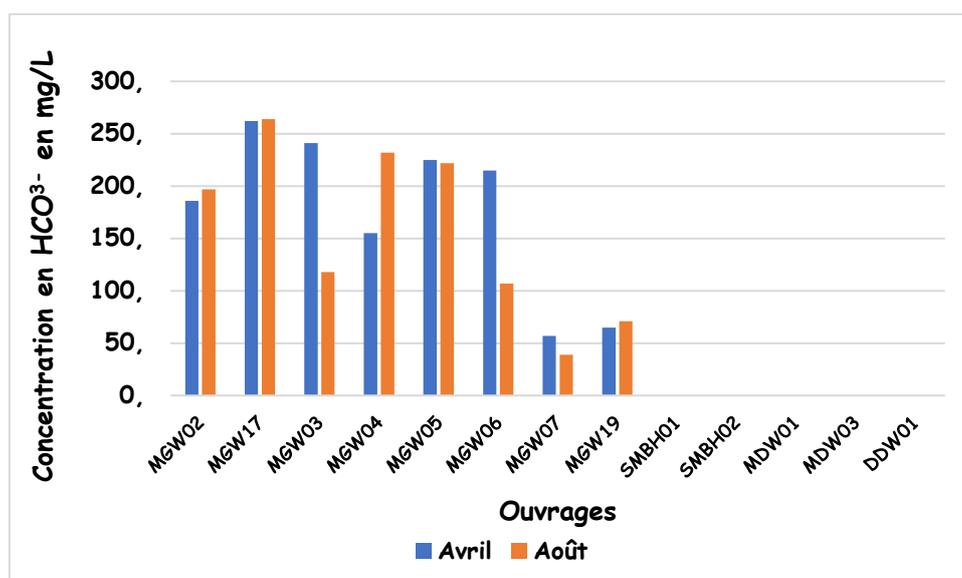


Figure 24 : Concentrations en HCO₃⁻ des eaux souterraines échantillonnées

Les résultats des analyses le confirment avec de fortes concentrations en ions bicarbonates dans les eaux souterraines aussi bien en période de basses eaux qu'en période de hautes eaux. Ces concentrations varient de 57 à 262 mg/L avec une valeur médiane de 200,5 mg/L en Avril et de 39 à 264 mg/L avec une valeur médiane de 157,5 mg/L (fig. 24). Les plus faibles valeurs sont enregistrées par les deux ouvrages situés dans le village de Tinkoto et les plus fortes valeurs sont enregistrées par l'ouvrage MGW17 du Camp de Massawa aussi bien en Avril qu'en Août.

▪ Nitrates

Les nitrates des eaux souterraines ont pour origine les réactions d'oxydo-réduction de matières organiques liées aux activités humaines ou la production animale ou végétale (Youssef 1996). Les concentrations des eaux souterraines en nitrates présentent de faibles valeurs en période de hautes eaux comme en période de basses eaux. Elles varient de 0,4 à 11,4 mg/L en Avril avec une valeur médiane de 0,4 mg/L et de 0,4 à 31,7 mg/L en Août avec une valeur médiane de 0,47 mg/L (fig. 25).

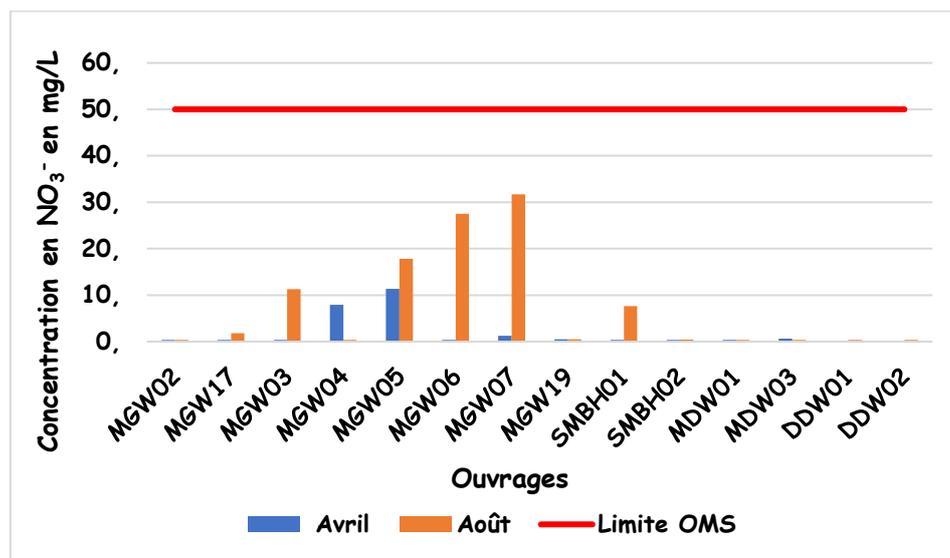


Figure 25 : Concentrations en NO_3^- dans les eaux souterraines échantillonnées

L'apport en nitrate est plus important durant le mois d'Août qu'en Avril. En effet, durant cette période de la saison, les cultures de subsistance pratiquées par les communautés locales s'intensifient un peu partout dans le permis. A cela, s'ajoutent les rejets d'eaux usées (eaux grises) surtout notés dans le village de Tinkoto, les dépotoirs d'ordures sauvages fréquemment rencontrés dans les villages et les déjections animales autour des dépotoirs et des points d'eau etc. qui peuvent constituer les principales sources d'apports d'ions NO_3^- dans les eaux (photos 8A, 8B, 8C et 8D). Cela se matérialise au niveau des résultats des ouvrages MGW06, MGW07 qui passent respectivement de 0,4 et 1,29 mg/L à 27,5 et 31,7 mg/L. Bien que les résultats des

analyses montrent que les eaux sont de bonne qualité dû au fait que les concentrations obtenues sont en dessous de la valeur guide de l'OMS pour la potabilité de l'eau de boisson, le long séjour des déjections animales aux abords des points d'eau pourrait contribuer à la "contamination" de la nappe en nitrates. Les forages profonds n'échappent pas à ce phénomène. Les fissures et fractures associées à ces aquifères assureraient le transit souterrain des nitrates par lessivage jusqu'à contaminer la nappe (Youssef 1996).



Photos 9A, 9B, 9C et 9D : illustrent les potentielles sources de nitrate dans la zone d'étude, rejets eaux usées ménagères à Tinkoto (9A), dépotoir sauvage d'ordures à Tinkoto (9B), déjections animales autour du forage (9C) et champs d'arachide et de Maïs à kanouméri (9D) (Crédit photo : Diouf, 2018)

▪ Sulfates

Les eaux du permis Kanoumba présentent de très faibles concentrations en sulfates. Elles varient de 1 à 21 mg/L en Août avec une valeur médiane de 1 mg/L et de 1 à 22 mg/L avec une valeur médiane de 1 mg/L en Avril (fig. 26). Les concentrations obtenues sont largement inférieures à la valeur guide de l'OMS fixée à 200 mg/L.

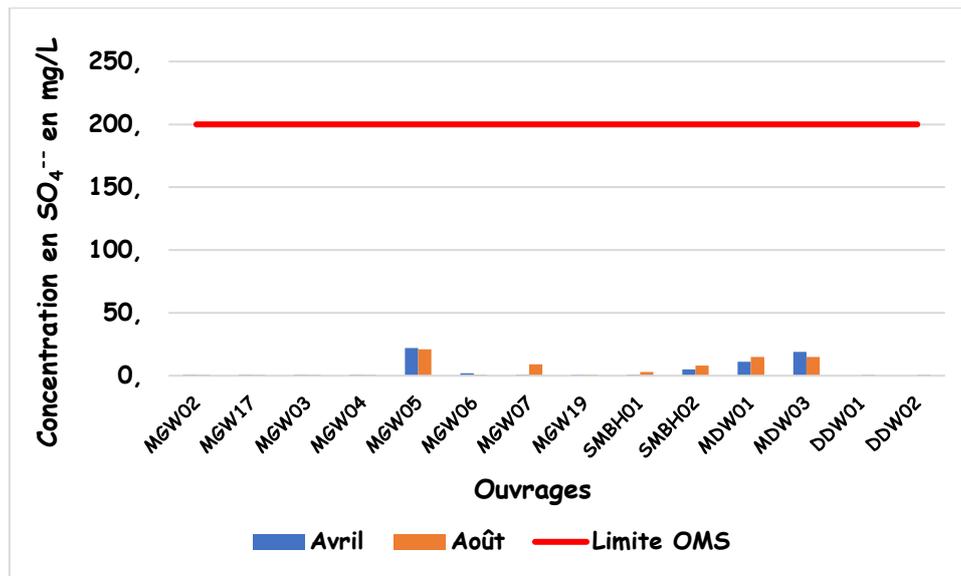


Figure 26 : Concentrations en SO₄²⁻ des eaux souterraines échantillonnées

❖ Eléments traces métalliques

Ils sont omniprésents dans tous les compartiments de l'environnement notamment dans les eaux naturelles ou leurs concentrations sont en général très faibles (moins de 0,1 mg/L). Cela fait dire à Attal (2005), que les métaux sont présents " en traces " ou ils sont aussi " la trace " du passé géologique et de l'activité de l'Homme. Ceci explique leur dénomination de « métaux traces » ou « éléments traces métalliques » (ETM). Cependant, la classification en métaux lourds est souvent discutée car certains métaux toxiques ne sont pas particulièrement « lourds » (le zinc), tandis que certains éléments toxiques ne sont pas des métaux (arsenic qui est un métalloïde). Ce terme générique désigne donc indistinctement des métaux et métalloïdes réputés toxiques (INERIS, 2006). Selon Diop (2019), les ETM sont de deux catégories, les éléments traces essentiels (Cu, Zn, Fe, Al, Cr) qui sont indispensables aux processus biologiques, mais sont toxiques à fortes concentrations et les éléments traces non-essentiels (As ; Pb, Hg, Sb), qui n'ont aucune fonction métabolique et qui sont souvent toxiques à un seuil inférieur à celui des éléments essentiels. La présence de métaux lourds dans l'environnement résulte de causes naturelles (altération, dissolution, hydrolyse) et des activités humaines (exploitation minière, activités industrielles, agriculture, feu de brousse). Ces concentrations en éléments traces dans les eaux de consommation peuvent être fortement influencées par l'activité anthropique ou la nature des terrains géologique. Dans certaines zones minières, les concentrations en éléments traces métalliques sont localement élevées (INERIS 2006). La projection des résultats d'analyses chimiques des eaux souterraines avec le logiciel Origin pro donne une idée sur la répartition des concentrations des ETM dans le permis Kanoumba.

Globalement, ces résultats montrent que l'Aluminium et le Fer constituent les ETM largement dominant dans la zone d'étude (fig. 27).

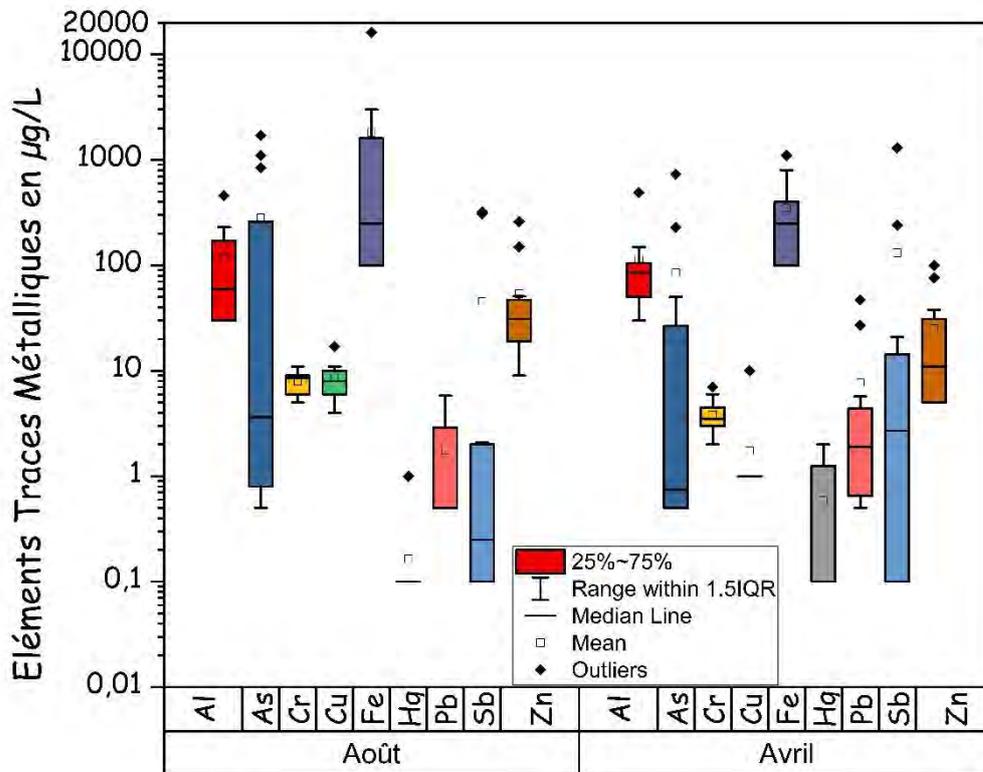


Figure 27 : Concentrations en $\mu\text{g/L}$ des eaux souterraines en ETM dans le permis Kanoumba

▪ Aluminium

Présent à l'état de trace dans les eaux, l'Aluminium est l'un des métaux les plus abondants de la croûte terrestre. Dans le permis Kanoumba, les résultats des analyses montrent des concentrations en Aluminium relativement élevées. Elles varient de 30 à 490 $\mu\text{g/L}$ avec une valeur médiane de 85 $\mu\text{g/L}$ en Avril et de 30 à 460 $\mu\text{g/L}$ avec une valeur médiane de 60 $\mu\text{g/L}$ (fig. 28). Des concentrations supérieures à la valeur guide de l'OMS fixée à 200 $\mu\text{g/L}$ ont été enregistrées pour les ouvrages MGW07 en Avril, SMBH01 en Août, et MGW02 en Août. En effet, ces teneurs relativement élevées en Aluminium enregistrées pour ces ouvrages pourraient être liées à la proximité de ces ouvrages aux sites d'exploitation minières artisanale et à petite échelle d'or mais aussi du lessivage des terrains latéritiques par les eaux météoriques. D'après Bamba (2012) et Diawara (2018), les rejets miniers non traités et contrôlés provenant des activités d'orpaillage faciliteraient ainsi la libération et la solubilisation de l'Al dans les eaux. Nos résultats obtenus corroborent avec ceux de (Mall (2017) et Diop (2019).

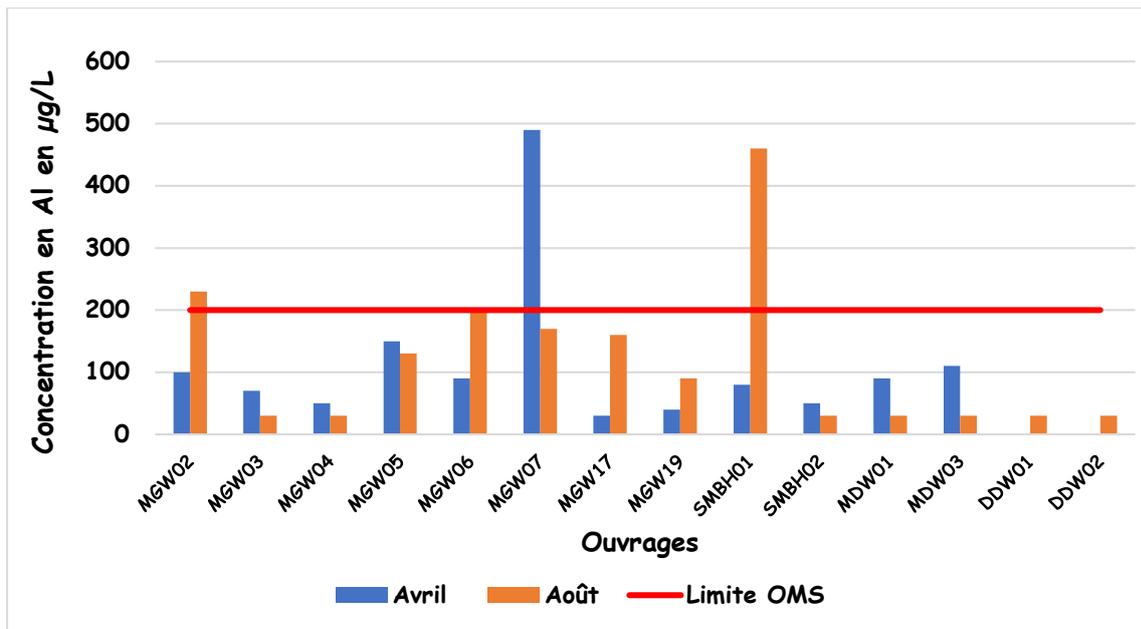


Figure 28 : Concentrations en Al des eaux souterraines échantillonnées

■ Antimoine

L'antimoine est très peu abondant dans l'écorce terrestre. Le minéral le plus abondant est la stibine (SbS_2) qui est associé autres minéraux sulfurés dont la galène (PbS) et la pyrite (FeS_2) dans les roches du socle et est aussi associé au quartz (SiO_2) dans les veines hydrothermales. Il peut être présent dans les eaux souterraines des terrains riches en minéraux sulfurés.

A l'échelle du secteur de Kanoumba, les concentrations en Antimoine dans les eaux sont très hétérogènes. Elles varient de 0,1 à 1300 $\mu g/L$ avec une valeur médiane de 2,7 $\mu g/L$ en Avril et de 0,1 à 320 $\mu g/L$ avec une valeur médiane de 0,25 $\mu g/L$ en Août (fig. 29).

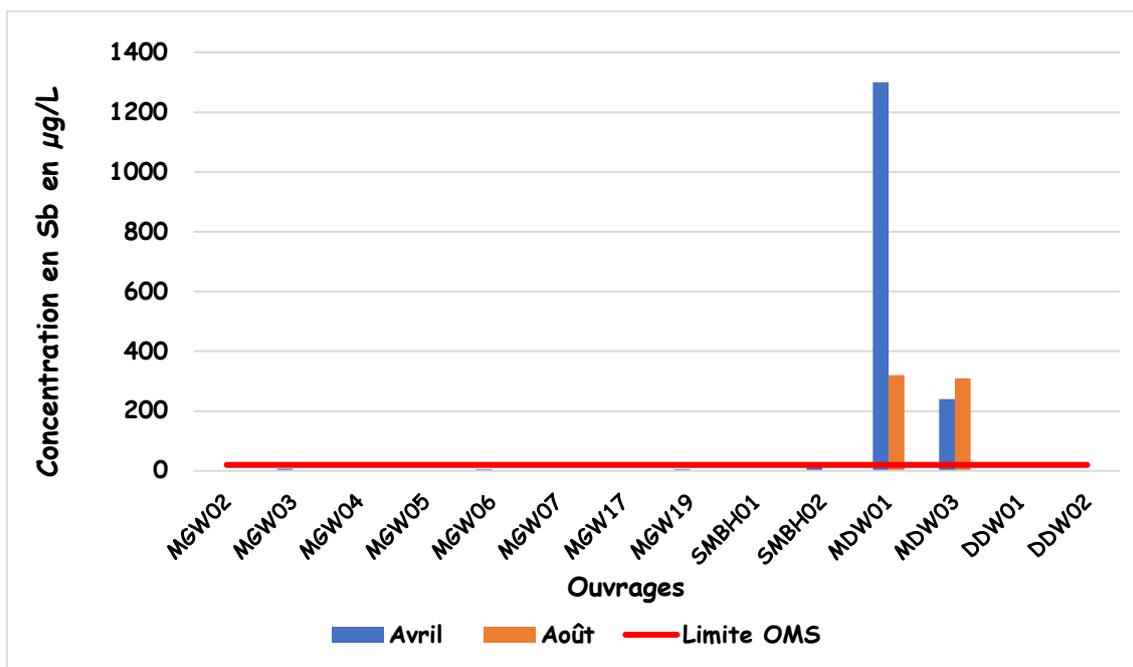


Figure 29 : Concentrations en Sb des eaux souterraines échantillonnées

De très fortes concentrations dépassant largement la valeur guide de l’OMS fixée à 20 µg/L sont enregistrées vers Massawa centrale zone. Ces concentrations inhabituelles en antimoine vers Massawa centrale zone sont d’origine géogénique c’est-à-dire liée la nature des terrains. En effet, d’un point de vue géologique et structural, la structure qui porte la minéralisation de l’or dans ce secteur est impure (associée aux minéraux sulfurés) et correspond à la MTZ. Dans le secteur de Massawa centrale zone, cette dernière est associée à des veines de quartz-stibine à proximité de la roche encaissante volcanoclastique avec de la pyrite (FeS₂) et de l’arséno-pyrite (FeAsS) disséminées dans la roche intrusive. Les travaux de Manlius (2009) avaient montré que les sels solubles d’antimoine peuvent provoquer, après ingestion, des effets irritants au niveau gastro-intestinal se traduisant par des vomissements, des crampes abdominales et des diarrhées. De fortes doses (plusieurs centaines de milligrammes) peuvent entraîner une toxicité cardiaque.

▪ **Arsenic**

L’arsenic est l’un des éléments traces métalliques les plus toxiques et le métalloïde le plus fréquent dans les eaux et les sols (Manlius, 2009). Le minéral le plus commun contenant de l’arsenic est l’arséno-pyrite (FeAsS). Les principaux minéraux exploités pour extraire de l’arsenic ont été, outre l’arséno-pyrite, l’orpiment (As₂S₃), le réalgar (AsS) et l’énargite (Cu₃AsS₄) (INERIS 2006). Dans le permis Kanoumba, les résultats des analyses dans certains secteurs montrent des concentrations en Arsenic qui dépassent de loin la valeur guide admissible fixée à 10 µg/L par l’OMS (2017). Elles varient de 0,5 à 730 µg/L avec une valeur médiane de 0,75 µg/L en Avril et de 0,5 à 1700 µg/L avec une valeur médiane de 3,6 µg/L en Août (fig. 30).

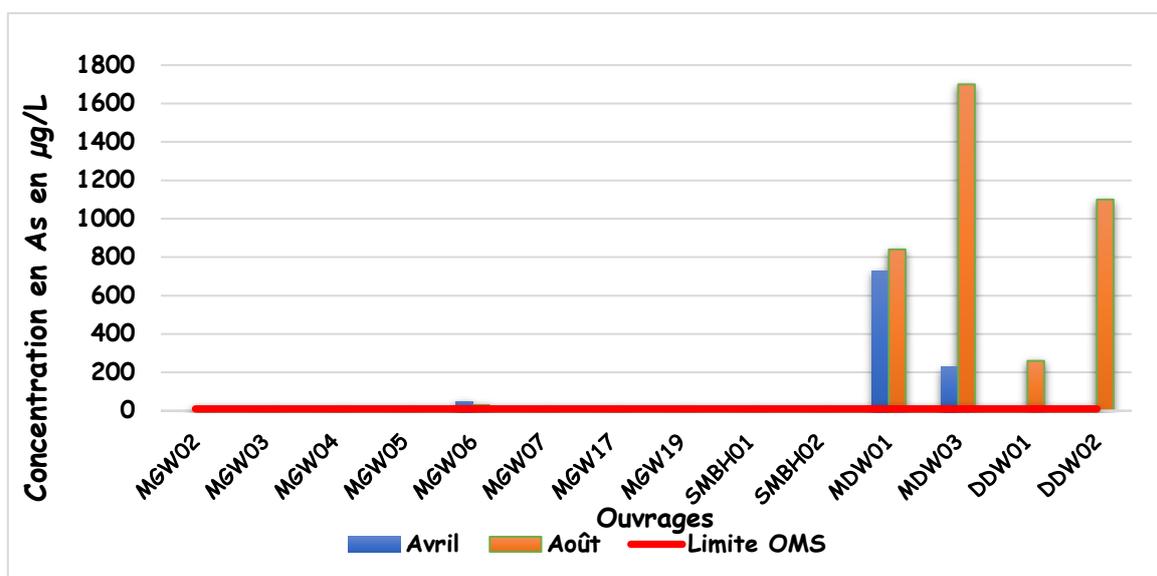


Figure 30 : Concentrations en As des eaux souterraines échantillonnées

Tout comme l'antimoine, les fortes concentrations en Arsenic rencontrées vers Massawa centrale zone et Delya sont liées au contexte géologique et structural. En effet, dans le permis Kanoumba, la minéralisation de l'or dans les secteurs de Delya et de Massawa centrale est contrôlée par la MTZ d'où la contamination géogénique rencontrée dans ces secteurs. Cette structure, impure, est associée aux minéraux sulfurés (l'arsénopyrite prédomine sur la pyrite). Les travaux de Bamba (2012) effectués dans un contexte géologique similaire, avaient montré que ce genre de concentration n'est pas inhabituel dans les formations géologiques du birimien et particulièrement dans les zones aurifères qui contiennent de l'arsénopyrite (FeAsS).

A la différence du secteur de des secteurs de Massawa centrale zone et Delya, la minéralisation de l'or dans le secteur de Sofia est contrôlée par la faille N-S de Sabodala. Cette structure est pure (non associée à des minéraux sulfurés) d'où les faibles concentrations en antimoine et en arsenic pour les ouvrages situés dans ce secteur.

Selon l'Institut de Veille Sanitaire (InVS), il est démontré que de fortes concentrations (plusieurs centaines de $\mu\text{g/L}$), l'arsenic hydrique est impliqué de manière causale dans le développement des cancers cutanés (carcinomes et mélanomes), de la vessie (en particulier du carcinome à cellules transitionnelles) et du poumon, et probablement dans l'apparition du diabète non insulino-dépendant (Ravault et *al.*, in Manlius, 2009). Par contre, pour les faibles concentrations d'arsenic dans l'eau de boisson (inférieures à $50 \mu\text{g/L}$) les études donnent des résultats nuancés, certains ayant tendances à établir un lien entre les faibles concentrations et l'apparition de cancers de la vessie et du poumon (Ravault et *al.*, in Manlius, 2009). Selon INERIS, (2007), les principaux cancers liés à une exposition à l'arsenic sont les cancers de la peau, de la vessie, des poumons, des reins et du foie.

▪ **Chrome**

Le chrome est généralement peu présent dans l'eau, sa présence est le plus souvent liée aux rejets des ateliers de galvanoplastie. Ce métal est principalement utilisé pour le chromage, la fabrication d'alliages, d'agents oxydants, d'inhibiteurs de la corrosion (par ajout de certains de ses composés à l'eau industrielle de refroidissement comme élément anticorrosion) (Matini, Moutou, et Kongo-Mantono, 2010). Dans les eaux analysées des concentrations en Chrome relativement faibles sont enregistrées. Elles varient de 2 à $7 \mu\text{g/L}$ avec une valeur médiane de $3,5 \mu\text{g/L}$ en Avril et de 5 à $11 \mu\text{g/L}$ avec une valeur médiane de $8,5 \mu\text{g/L}$ en Août (fig. 31). Ces concentrations obtenues sont largement inférieures à la valeur guide de l'OMS fixée à $50 \mu\text{g/L}$ pour l'eau de consommation humaine.

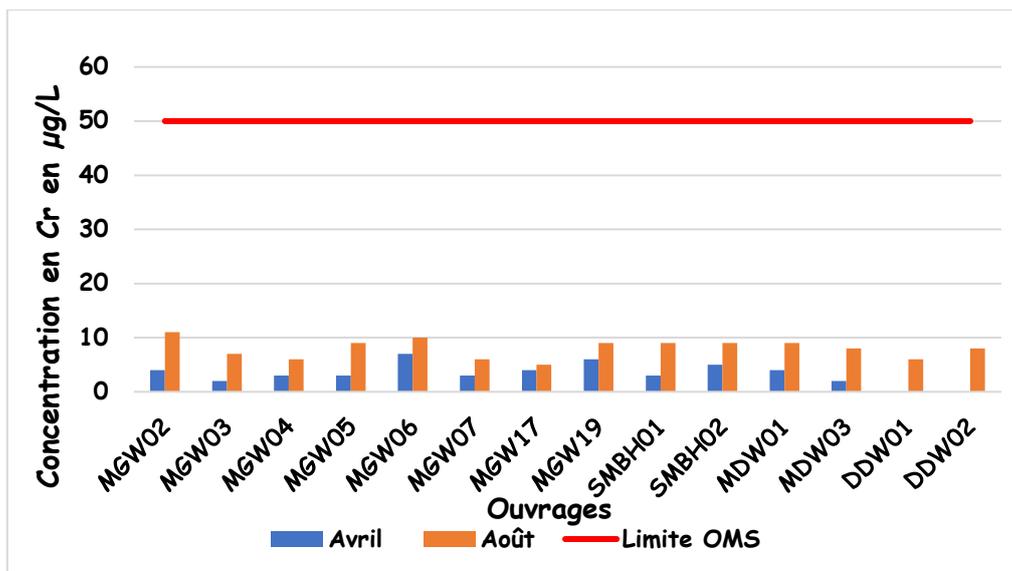


Figure 31 : Concentrations en Cr des eaux souterraines échantillonnées

❖ Cuivre

La composition moyenne de la croûte terrestre en cuivre serait comprise entre 45 et 70 mg/kg. Le cuivre est un élément chalcophile qui se trouve associé à des sulfures [chalcopyrite (CuFeS_2), chalcosine (Cu_2S)], avec le plomb, le cadmium et le zinc. Il est habituellement présent en petites quantités dans des minerais de zinc. Il est à la fois un nutriment essentiel et un contaminant de l'eau de boisson (OMS 2017). Les résultats des analyses montrent des concentrations en Cuivre relativement faibles dans les eaux souterraines. Elles varient de 1 à 10 $\mu\text{g/L}$ avec une valeur médiane de 1 $\mu\text{g/L}$ en Avril et de 4 à 17 $\mu\text{g/L}$ avec une valeur médiane de 8 $\mu\text{g/L}$ en Août (fig. 32).

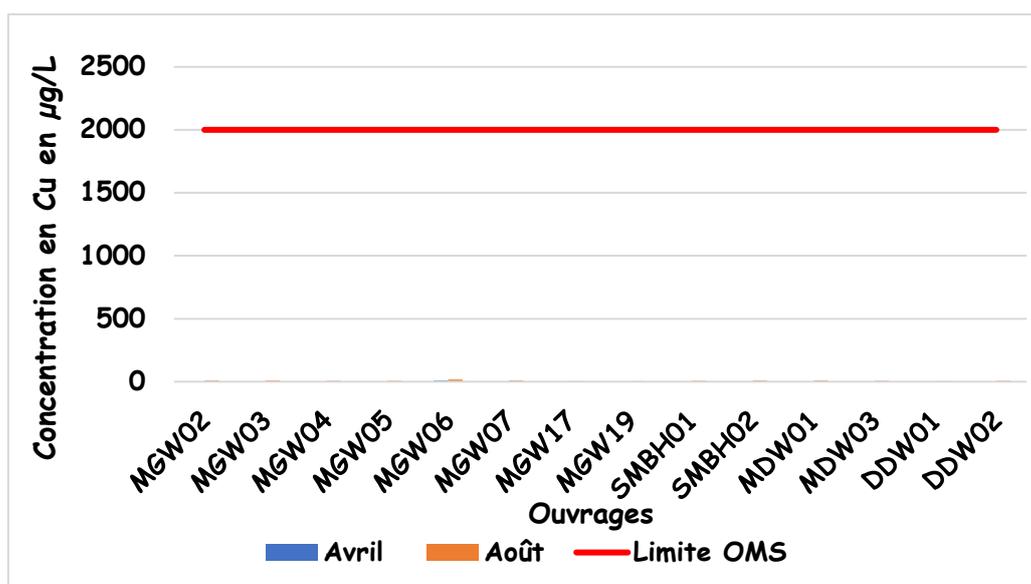


Figure 32 : Concentrations en Cu des eaux souterraines échantillonnées

Bien que les concentrations obtenues durant la période de hautes eaux soient nettement plus importantes, ces teneurs sont largement inférieures à la valeur guide de l’OMS pour l’eau de consommation humaine.

▪ **Fer**

Le fer est un des nutriments qu'on retrouve dans les aliments, parce que cet élément est essentiel pour l’homme (et les autres organismes) notamment dans la composition de l’hémoglobine du sang qui permet aux globules rouges la fixation et le transport de l’oxygène dans le corps humain (Anonyme, 2007 in Aranguren, 2008). Par ailleurs, il est l’un des éléments les plus répandus dans l’environnement. Sa présence dans l’eau peut être d’origine naturelle ou anthropique. Dans le contexte du Sénégal oriental, le fer provient pour l’essentiel des oxydes et hydroxydes de fer provenant des altérites essentiellement constituées dans leur partie supérieures de la cuirasse et la carapace latéritique. Des concentrations très élevées en fer sont rencontrées dans les eaux souterraines. Elles varient de 100 à 1100 µg/L avec une valeur médiane de 250 µg/L en Avril et de 100 à 16200 µg/L avec une valeur médiane de 250 µg/L en Août (fig.33). Les plus fortes concentrations sont rencontrées vers Delya. En effet, la structure minéralisée principale de Delya se situe au contact entre le gabbro et l’ensemble sédimentaire et est limitée par deux unités de schistes carbonés. Selon Diop (2019), dans un environnement similaire à la zone d’étude, la source principale de fer dans les eaux souterraines est liée à l’altération de minéraux ferromagnésiens abondants dans les gabbros, les basaltes et les pyroxénites.

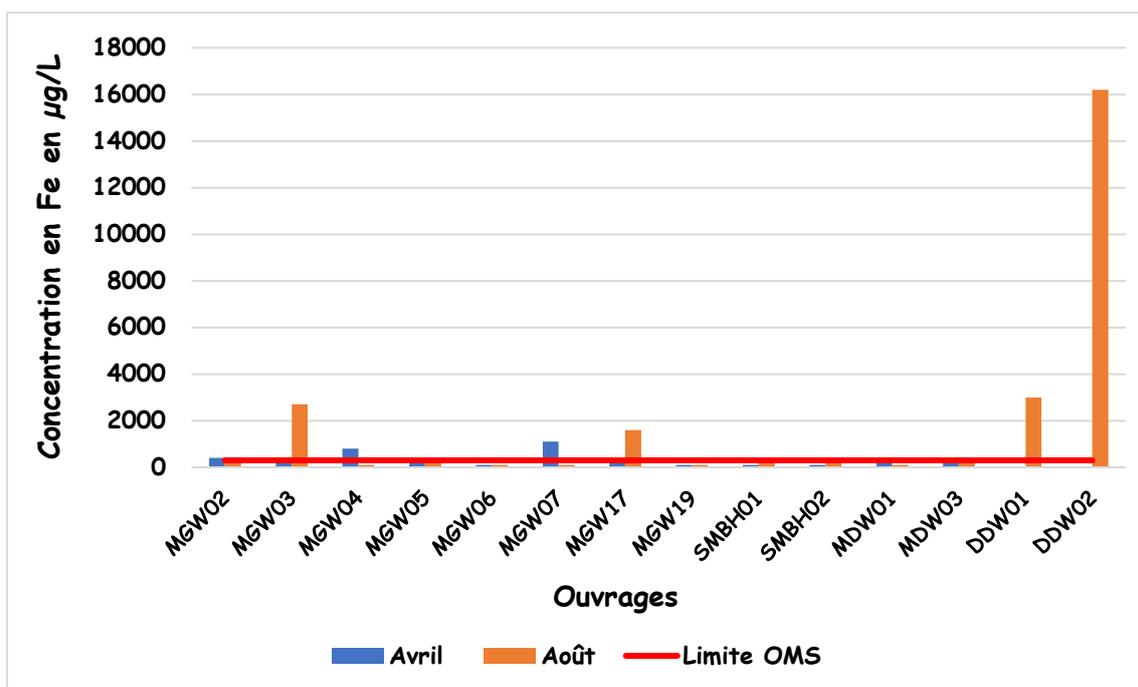


Figure 33 : Concentrations en Fe des eaux souterraines échantillonnées

▪ **Mercur**

Le mercure est l'un des éléments trace métalliques les plus étudiés durant les deux dernières décennies et cela en raison de la toxicité de ses espèces notamment du méthyl mercure (CH_3Hg^+ ou MeHg) et de l'aptitude de cette dernière à la bioaccumulation et surtout à la bioamplification dans les réseaux trophiques (Ghanem, 2008). Selon Pirrone et al., (2001), le mercure peut être libéré dans l'atmosphère par diverses sources naturelles (volatilisation, feux de forêts, éruption et dégazage des volcans) et anthropiques (combustion du charbon, du pétrole et du bois, incinération des ordures, cimenteries, etc.). Dans la zone d'étude, la source principale de libération de mercure est le secteur de l'EMAPE d'or par l'utilisation du mercure à travers le brûlage de l'amalgame de mercure et la libération de mercure et des rejets contenant du mercure sur l'environnement. En effet, on trouve plusieurs sites d'exploitation artisanale d'or dans le permis Kanoumba.

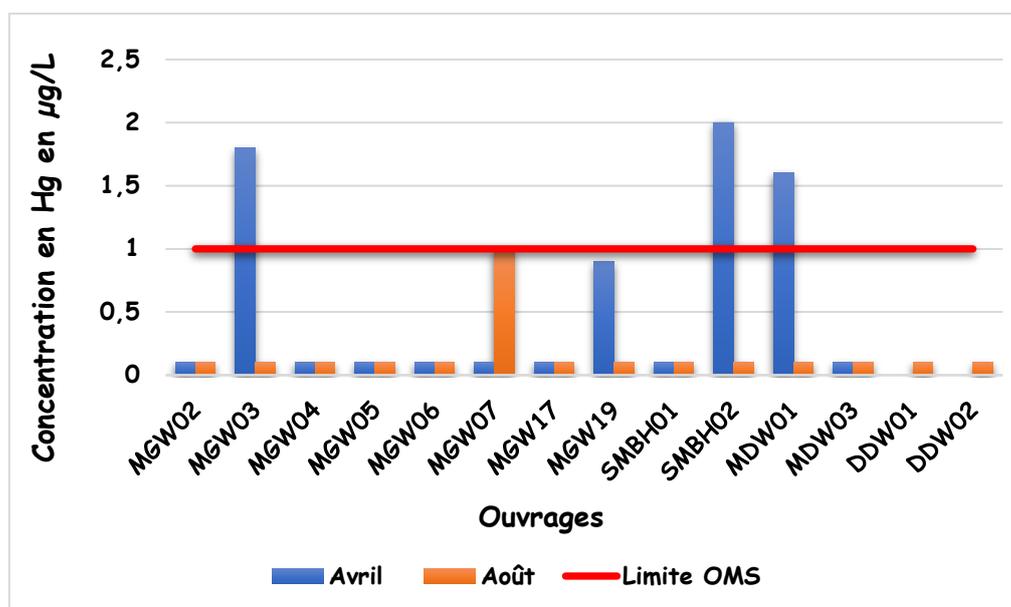


Figure 34 : Concentrations en Hg des eaux souterraines échantillonnées

Les résultats des analyses portant sur le mercure dissout révèlent des teneurs relativement faibles avec parfois des concentrations au-dessus de la valeur guide de l'OMS dans certains ouvrages. Elles varient de 0,1 à 2 µg/L avec une valeur médiane de 0,1 µg/L en Avril et de 0,1 à 1 µg/L avec une valeur médiane de 0,1 µg/L en Août. A l'exception de l'ouvrage MGW 07 du village de Tinkoto qui a une valeur de 1 µg/L, tous les ouvrages étudiés en Août ont des valeurs de 0,1 µg/L largement en dessous de la valeur admissible. Alors qu'en Avril plusieurs ouvrages enregistrent des valeurs supérieures à la norme de l'OMS pour de boisson (MDW01, MGW03, SMBH02) (fig. 34). Ceci pourrait être dû à la proximité des ouvrages MDW01 et SMBH02 aux zones d'orpaillage alors que pour MGW03, cette forte concentration pourrait être

liée au brulage de l'amalgame or + mercure dans les lieux d'habitation à Kanoumériing. En effet, le constat qui est fait sur le terrain est qu'après traitement de l'or à Tinkoto par les femmes de Kanoumériing, l'amalgame obtenu est amené par ces dernières dans le village de Kanoumériing pour y effectuer le brûlage. A cela s'ajoute un paramètre climatologique très important qui est la pluviométrie. En effet, pour le mois d'Avril l'activité d'exploitation artisanale d'or au Sénégal oriental est à son paroxysme ce qui coïncide avec la période de basses eaux d'où une concentration plus élevée de Hg dans les eaux (MDW01, MGW03, SMBH02 avec respectivement comme valeurs 1,6 µg/L, 1,3 µg/L, 2 µg/L). Alors qu'en Août, le phénomène de dilution des eaux peut masquer la présence de Hg dans les eaux. En ce sens, les travaux de Niane (2014), portant sur les impacts environnementaux liés à l'utilisation du mercure à Kédougou, ont montré que la variabilité saisonnière notée dans les concentrations en mercure des sédiments confirme le caractère anthropogénique de son introduction dans l'écosystème. Il a aussi montré que les teneurs maximales sont notées pendant la saison sèche lorsque les activités d'orpillage atteignent leur maximum d'intensité (Niane, 2014). D'après le plan d'action national visant à réduire, et si possible éliminer l'utilisation du mercure dans le secteur de l'exploitation artisanale et à petite échelle d'or au Sénégal, des concentration élevées de Hg peuvent avoir des effets toxiques sur les systèmes nerveux, digestif et immunitaire, ainsi que sur les poumons, les reins, la peau et les yeux.

▪ **Plomb**

Le principal minerais de plomb est la galène (PbS), très souvent associée à la blende (ZnS) et à la pyrite (FeS₂). Il est très souvent associé au zinc dans les minerais mais aussi à de nombreux autres éléments comme (Fe, Cu, Cd, As, ...) qui sont en grande partie récupérés lors des opérations métallurgiques. Dans le permis Kanoumba, le plomb est présent dans l'ensemble des ouvrages étudiés. Les résultats obtenus présentent parfois des concentrations plus élevées que la valeur guide de l'OMS pour l'eau de consommation humaine. Ils varient de 0,5 à 47 µg/L avec une valeur médiane de 1,9 µg/L en Avril et de 0,5 à 5,8 µg/L avec une valeur médiane de 0,5 µg/L en Août (fig. 35). Les plus fortes concentrations sont obtenues durant la période de basses eaux. Des valeurs largement au-dessus de la valeur guide de l'OMS fixée à 10 µg/L pour l'eau de consommation humaine sont enregistrées par les ouvrages MGW03 (27 µg/L) et MDW01 (47 µg/L) durant cette période. Pour Attal (2005), en raison de sa toxicité, une exposition humaine au plomb peut provoquer le saturnisme (l'ensemble des manifestations de l'intoxication par le Plomb).

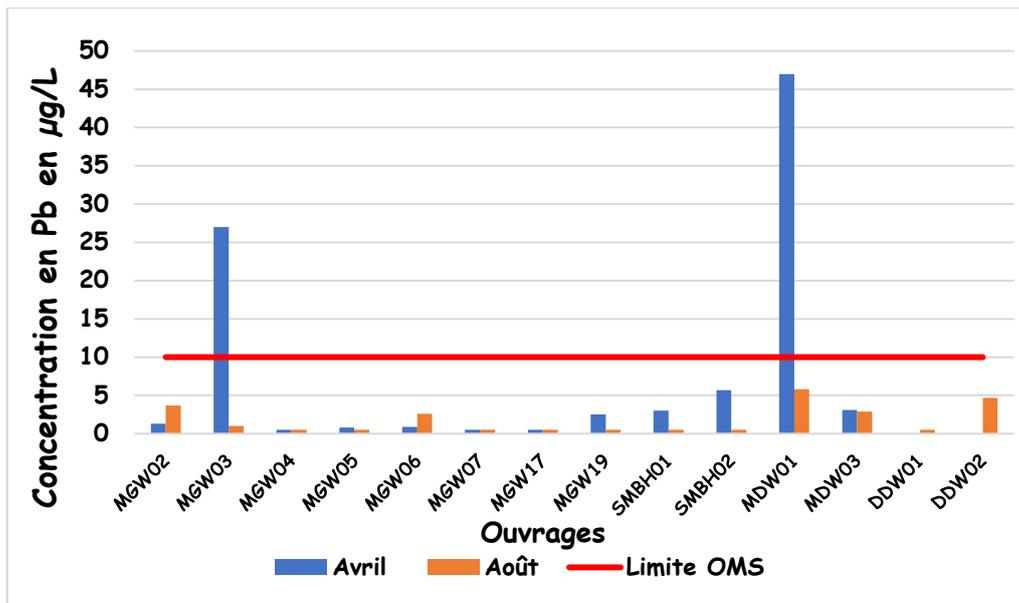


Figure 35 : Concentrations en Pb des eaux souterraines échantillonnées

Il faut aussi noter que le plomb est également capable de se substituer au calcium des os. Et pire, il faudra ensuite près de 20 ans pour éliminer des os la moitié de cette dose de plomb (OMS, 2017). C'est pourquoi le risque d'intoxication saturnienne est plus élevé chez les jeunes enfants, plus particulièrement de 1 à 3 ans que chez les adultes (Attal, 2005).

▪ Zinc

Habituellement le zinc est rencontré en association avec le plomb, le cuivre, l'or et l'argent. D'après INERIS (2006), la teneur moyenne en zinc de la croûte terrestre serait comprise entre 70 et 132 mg/kg. En tant que métal cationique, le zinc confère un goût astringent indésirable à l'eau à une concentration seuil d'environ 4 mg/L sous forme de sulfate de zinc tandis que l'eau contenant du zinc à des concentrations supérieures à 3–5 mg/L peut apparaître opalescente et former un film grassex quand elle est portée à ébullition (OMS, 2017). Selon, Heijerick et *al.*, (2002) ; Chiffolleau, (2001) ; Fairbrother et *al.*, (2007), le zinc est un oligo-élément vital pour l'homme, sa déficience entraîne le nanisme. Dans les eaux analysées des concentrations en Zinc relativement faibles sont enregistrées. Les valeurs obtenues sont largement inférieures à la valeur guide de l'OMS pour l'eau de consommation humaine fixée à 3000 µg/L. Elles varient de 5 à 100 µg/L avec une valeur médiane de 11 µg/L en Avril et de 9 à 260 µg/L avec une valeur médiane de 31 µg/L en Août (fig. 36).

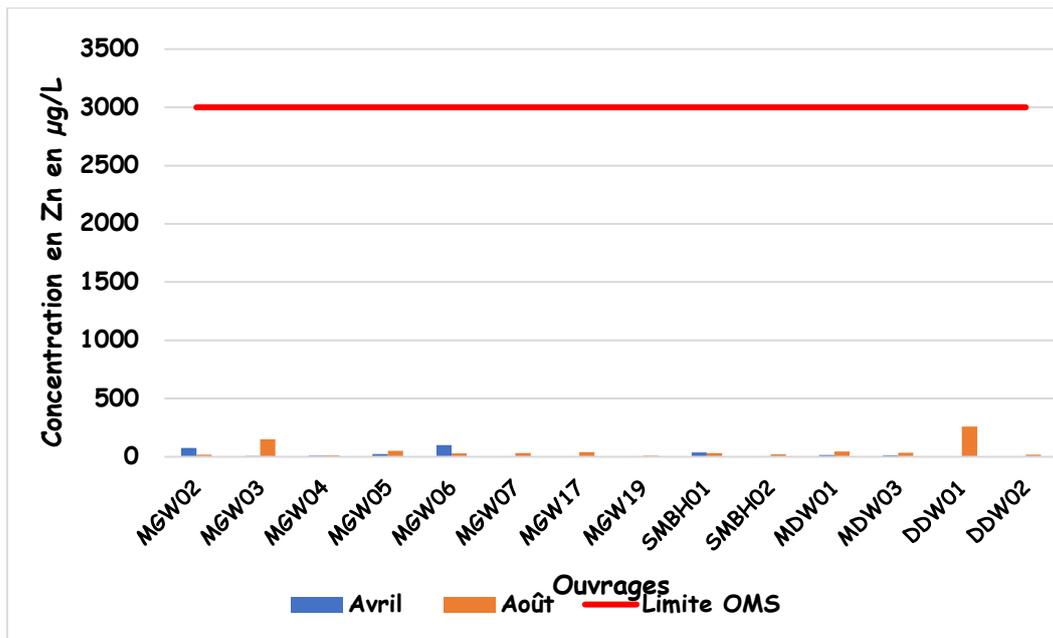


Figure 36 : Concentrations en Zn des eaux souterraines échantillonnées

4.2.2. Eaux de surface

Dans l'environnement aquatique, les métaux se trouvent dans les fractions solubles, colloïdales et particulaires, principalement sous forme de cations métalliques. Ils sont souvent indispensables au métabolisme des êtres vivants (oligo-éléments) bien que parfois, certains d'entre eux puissent être considérés comme toxiques lorsque leur concentration dépasse une valeur seuil (Lesven, 2008). Dans cette partie, l'évaluation de la qualité des eaux de surface n'a pas pu se faire comme pour les eaux souterraines en raison de la nature saisonnière des cours d'eaux situés dans le permis Kanoumba (photo 5A et 5B). Seule la station de collecte du fleuve Gambie (cours d'eau principal et permanent) situé à Mako a connu une campagne d'échantillonnage en Avril et en Août. Les autres stations n'ont été échantillonnées qu'en Août.

4.2.2.1 Caractéristiques physico-chimiques

- pH

Le pH (potentiel d'hydrogène) constitue un facteur limitant pour les processus d'épuration (survie des bactéries, nitrification, précipitation du phosphore) d'où l'importance de contrôler ce facteur. Dans le permis Kanoumba, les valeurs de pH obtenues révèlent que les eaux de surface tout comme les eaux souterraines sont légèrement acides à neutres. Elles varient de 6,1 à 7,2 avec une valeur médiane de 6,85 en Août alors qu'en Avril la station de Mako MSW01 enregistre une valeur de 7 (fig. 37). Selon le CCME (2008), le pH ne devrait pas être inférieur à 6,5 ni supérieur à 9,0 en vue de la protection de la vie aquatique.

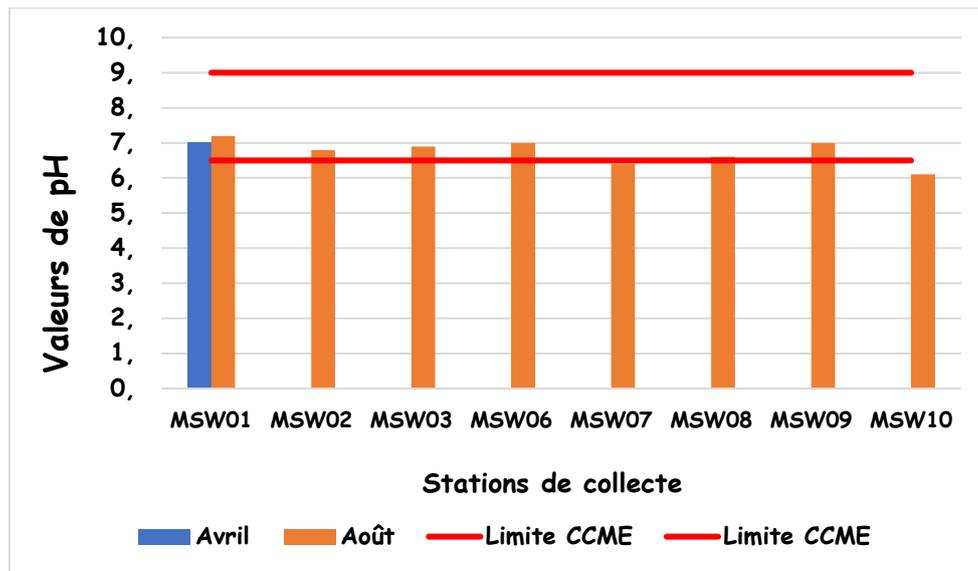


Figure 37 : Valeurs de pH des eaux de surface échantillonnées

La plus faible valeur est égale à 6,1 et est enregistrée par l'ouvrage MSW10 alors que la plus forte valeur est égale à 7,2 et est enregistrée par le fleuve Gambie à Mako qui présente un caractère légèrement alcalin. Cette tendance à l'acidité du pH dans la zone d'étude pourrait avoir pour origine le phénomène du drainage minier acide lié au lessivage des minéraux sulfurés qui accompagnent l'or tels que la pyrite et l'arsénoxyde. A l'exception de la station MSW10, les résultats obtenus sont dans l'intervalle acceptable par le CCME pour le bon développement et la protection de la vie aquatique.

▪ Conductivité

La conductivité électrique renseigne sur le degré de minéralisation d'une eau (Nouayti, Khattach, et Hilali, 2015). Elle est déterminée par la teneur en substances dissoutes, la charge ionique, la capacité d'ionisation, la mobilité et la température de l'eau. Dans le permis Kanoumba, les valeurs de conductivité obtenues montrent que les eaux de surfaces présentent un degré de minéralisation relativement important. Elles varient de 180 à 610 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une valeur médiane de 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en Août alors qu'en Avril la station de Mako MSW01 enregistre une valeur de 870 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (fig. 38). La baisse de la minéralisation notée à Mako durant la période de hautes eaux (Août) peut être due aux phénomènes de dilution. Durant cette période, une forte affluence des cours d'eaux est rencontrée vers le fleuve Gambie.

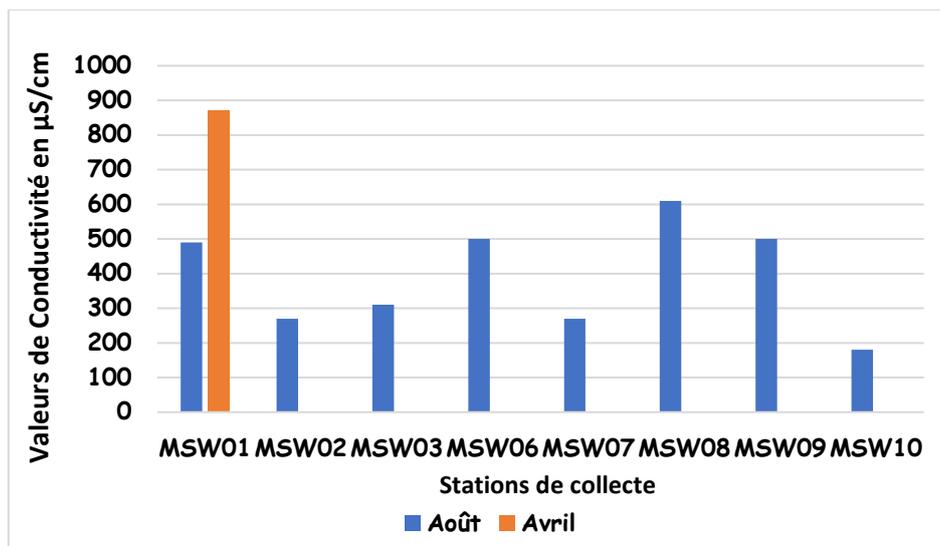


Figure 38 : Valeurs de CE des eaux de surface échantillonnées

- **Turbidité**

Les résultats de la turbidité des eaux de surface montrent comme les eaux souterraines que la turbidité des eaux est plus importante durant la période de hautes eaux. Les résultats varient de 30,6 à 171 NTU avec une valeur médiane de 57,05 NTU en Août $\mu\text{S}/\text{cm}$ alors qu'en Avril la station de Mako MSW01 enregistre une valeur de 1,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (fig. 39).

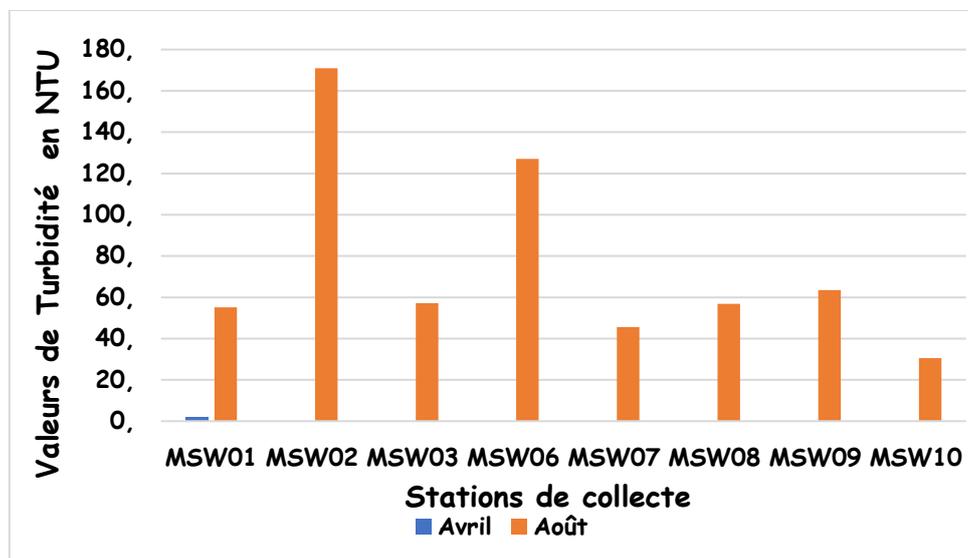


Figure 39 : Valeurs de turbidité des eaux de surface échantillonnées

En comparant les valeurs médianes de la turbidité des eaux obtenues en Août, la turbidité des eaux de surface est environ 18 fois plus importante que celle des aquifères. Au-delà de l'exposition des eaux de surface aux activités anthropiques, l'augmentation de la turbidité durant la saison des pluies pourrait être liée au pluviolessivage important et au charriage de la matière organique (déchets organiques, bouses de vaches important, rejets d'eaux usées), rejets

miniers qui se passent dans la zone particulièrement à travers les cours d'eau. Aucune valeur guide n'a été recommandée par le CCME pour la protection de la vie aquatique dans de pareilles eaux. Toutefois, ces fortes valeurs de turbidité enregistrées dans les eaux de surface peuvent réduire la production photosynthétique, générer des carences en oxygène, ou encore avoir des effets mécaniques sur les poissons par colmatage des branchies.



Photos 10A et 10B : aperçus sur la turbidité des eaux de la rivière de Tinkoto, exploitation artisanale alluvionnaire dans la rivière (10A) et partie de la rivière située en aval de la zone d'exploitation artisanale alluvionnaire (10B) (Crédit photo : Diouf, 2018)

4.2.2.2 Caractéristiques chimiques

❖ Ions majeurs

▪ Nitrates

Dans les eaux de surface, les concentrations en ions NO_3^- sont relativement faibles. Elles varient de 0,4 à 4,68 mg/L avec une valeur médiane de 0,4 en Août alors qu'en Avril la station de Mako MSW01 enregistre une valeur de 0,4 mg/L (fig. 40).

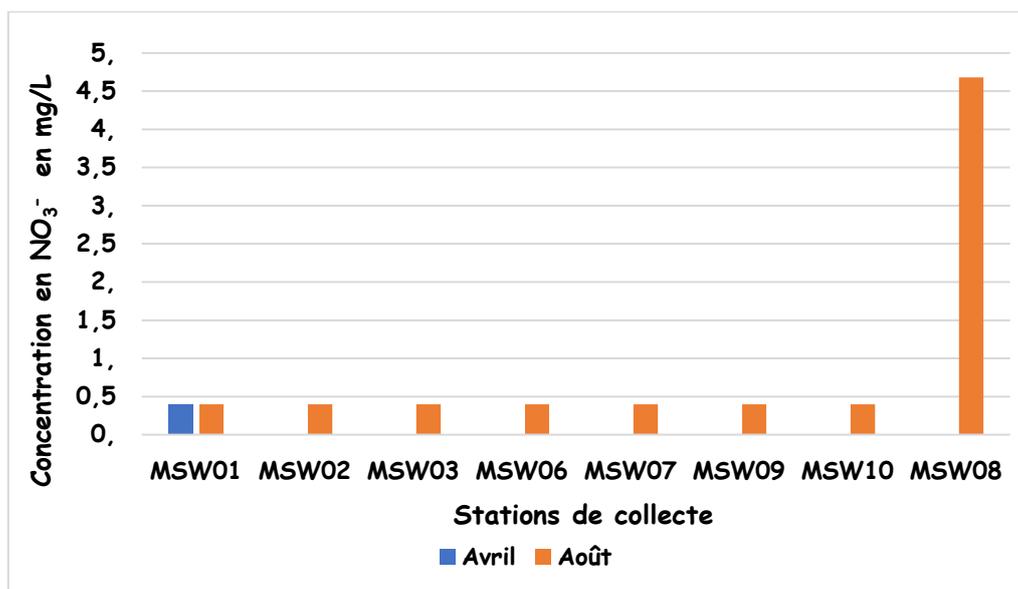


Figure 40 : Concentrations en NO_3^- des eaux de surface échantillonnées

La plus forte valeur de nitrate est rencontrée autour de la rivière de Tinkoto pour la station MSW08. En effet, au-delà de la forte démographie rencontrée dans le village de Tinkoto, des rejets d'eaux usées, les dépotoirs d'ordures longent une bonne partie de cette rivière (MSW08). Ce qui pourrait être à l'origine du résultat de cette station.



Photos 11A et 11B : dépotoirs sauvages dans la zone d'étude, dépotoir d'ordure sauvage à l'entrée de Tinkoto (11 A) et dépotoir d'ordures sauvage près de la station MSW08 (11B) (Crédit photo :Diouf, 2018)

❖ **Eléments traces métalliques**

▪ **Aluminium**

Tout comme les aquifères de socle, les résultats des analyses montrent des concentrations en Al relativement élevées dans les eaux de surface. Elles varient de 170 à 490 $\mu\text{g/L}$ avec une valeur médiane de 375 $\mu\text{g/L}$ en Août alors qu'en Avril la station de Mako MSW01 enregistre une concentration de 170 $\mu\text{g/L}$ (fig. 39). (fig. 41). Toutefois, les concentrations obtenues dans les eaux du permis sont plus importantes que celle enregistrées pour le fleuve Gambie à Mako. Les fortes concentrations obtenues dans le permis Kanoumba pourrait avoir pour origine les activités d'orpaillage qui se passent dans la zone. D'après Mall (2017) et Diawara (2018), Cet enrichissement relativement important en Al des eaux pourrait être lié au lessivage et au lavage du minerai d'or qui contribuent significativement à libérer l'Al, élément majeur de ces roches en solution, tendant ainsi à enrichir les eaux en cet élément. Ce qui d'après le CCME (2008), altère la protection de la santé humaine et menace la vie aquatique dans l'eau douce.

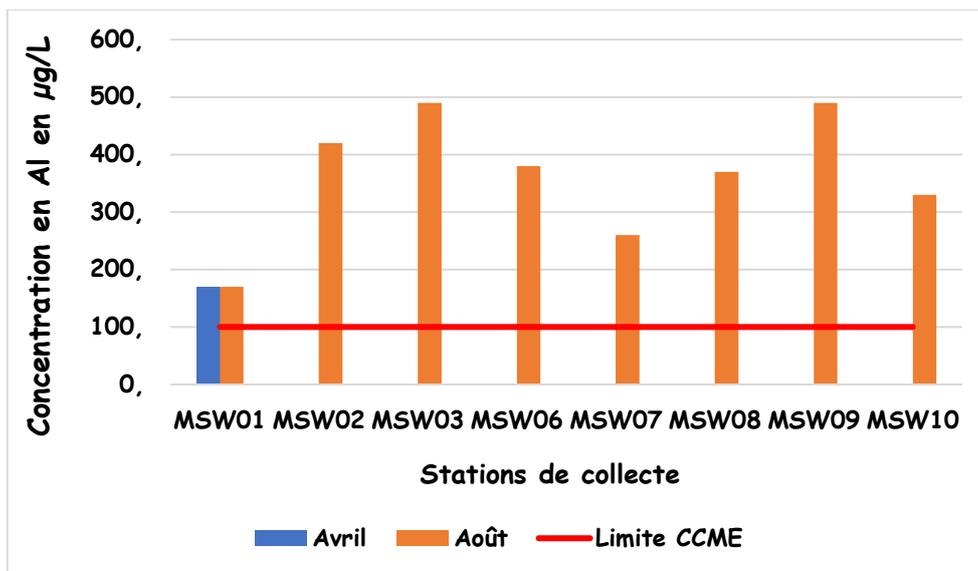


Figure 41 : Concentrations en Al des eaux de surface échantillonnées

▪ **Antimoine**

Les résultats des concentrations en Antimoine dans les eaux de surface sont relativement faibles. Elles varient de 0,1 à 3,6 µg/L avec une valeur médiane de 0,1 µg/L en Août alors qu'en Avril la station de Mako MSW01 enregistre une concentration de 63 µg/L (fig. 42)

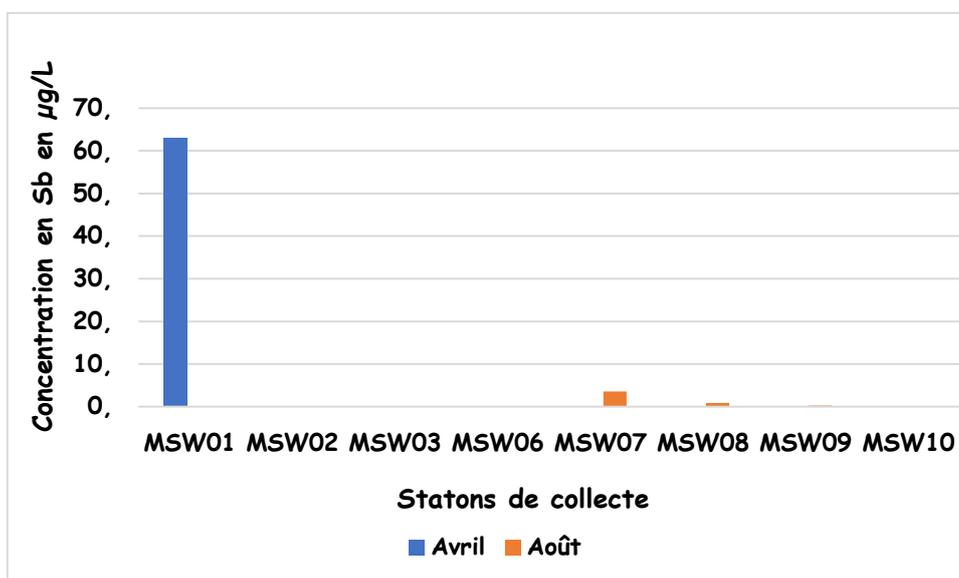


Figure 42 : Concentrations en Sb dans les eaux de surface échantillonnées

Aucune valeur guide n'a été recommandée par le CCME (2008) pour l'eau ambiante pour la protection de la santé humaine et de la vie aquatique dans les eaux ambiantes faute de données insuffisantes. Cependant, le fleuve Gambie à Mako a enregistré une forte concentration en antimoine durant la période de basses eaux avec une valeur de 63 µg/L. Cette valeur d'antimoine enregistrée pour le fleuve est inhabituelle dans les eaux de surface de la zone

d'étude. A l'état actuel des connaissances, il nous serait difficile d'apporter à jugement par rapport à la concentration en antimoine obtenue.

- **Arsenic**

L'arsenic est aussi présent dans l'eau (mer, rivière, lac, source, etc.) sous diverses formes chimiques dépendantes des propriétés chimiques du milieu. Dans les eaux de surfaces échantillonnées, les résultats des analyses obtenus montrent des concentrations relativement faibles. Elles varient de 0,5 à 1,9 µg/L avec une médiane de 0,55 µg/L en Août. Durant le mois d'avril, le fleuve Gambie enregistre une valeur de 1,9 µg/L (fig. 43).

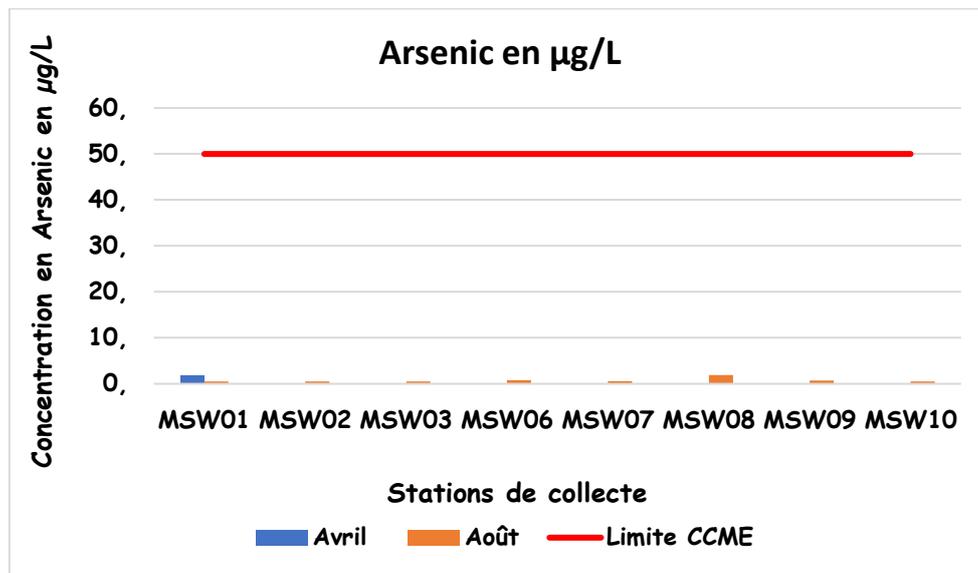


Figure 43 : Concentrations en As des eaux de surface échantillonnées

Selon le CCME, dans de pareilles eaux, la concentration de l'arsenic total ne devrait pas dépasser 50 µg/L afin de protéger les espèces aquatiques et en particulier les poissons. D'après les résultats obtenus dans les eaux de surface, les concentrations obtenues n'affectent pas le bon développement des espèces aquatiques dans ces eaux. Ces résultats confirment la nature ponctuelle, géogénique et profonde de la pollution en arsenic notée dans les eaux souterraines particulièrement dans les secteurs de Massawa centrale zone et Delya.

- **Chrome**

Les résultats des analyses montrent des teneurs en Cr relativement élevées dans les eaux de surfaces. Elles varient de 7 à 8 µg/L avec une valeur médiane de 8 µg/L en Août alors qu'en Avril la station de Mako MSW01 enregistre une concentration de 6 µg/L (fig. 44). Selon le CCME (2008), la concentration en Cr ne devrait pas dépasser 2 µg/L dans de pareilles eaux pour protéger la communauté aquatique particulièrement le zooplancton, le phytoplancton y compris les poissons.

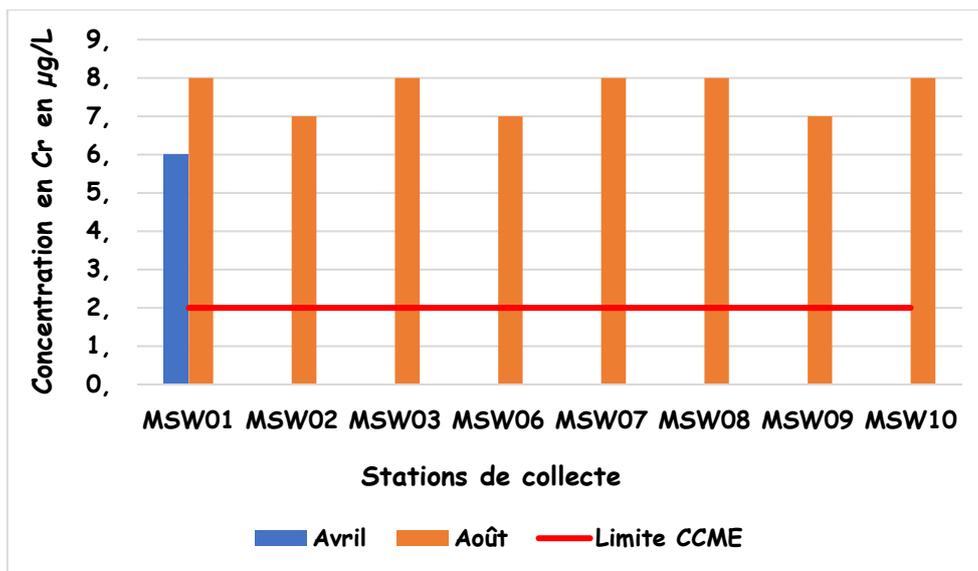


Figure 44 : Concentrations en Cr des eaux de surface échantillonnées

▪ **Cuivre**

Les concentrations en Cu dans les eaux de surface sont relativement élevées. Elles varient de 7 à 19 µg/L avec une valeur médiane de 7,5 µg/L. Excepté le fleuve Gambie à Mako qui présente une concentration en dessous de la recommandation du CCME 2 µg/L durant le mois d'Avril avec une valeur de 1 µg/L (fig. 45), toutes les eaux de surface présentent des valeurs supérieures à la recommandation du CCME pour protéger la vie aquatique et la faune. Selon (Fairbrother et al., 2007), l'industrie électrique et les peintures antisalissures (cuivre sous forme d'oxyde) constituent les sources principales de pollution de l'environnement aquatique (rivière, port et océan). La toxicité de ce métal pour les organismes aquatiques dépend de la forme chimique et de l'état d'oxydation dans lequel il se trouve.

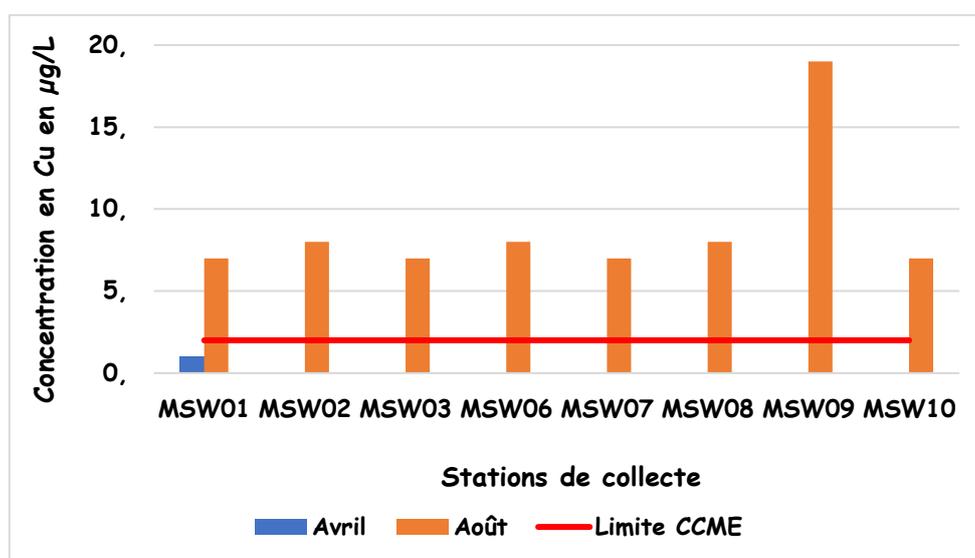


Figure 45 : Concentrations en Cu des eaux de surface échantillonnées

▪ Fer

Le fer est un élément indispensable à la nutrition humaine mais aussi pour les organismes aquatiques (c'est un micronutriment essentiel qui affecte leur cycle biogéochimique). Tout comme les eaux des aquifères de socle, les résultats des analyses montrent que les concentrations en Fe des eaux de surface sont relativement élevées. Elles varient de 300 à 800 µg/L avec une valeur médiane de 600 µg/L en Août alors qu'en Avril la station de Mako MSW01 enregistre une concentration de 600 µg/L (fig. 46).

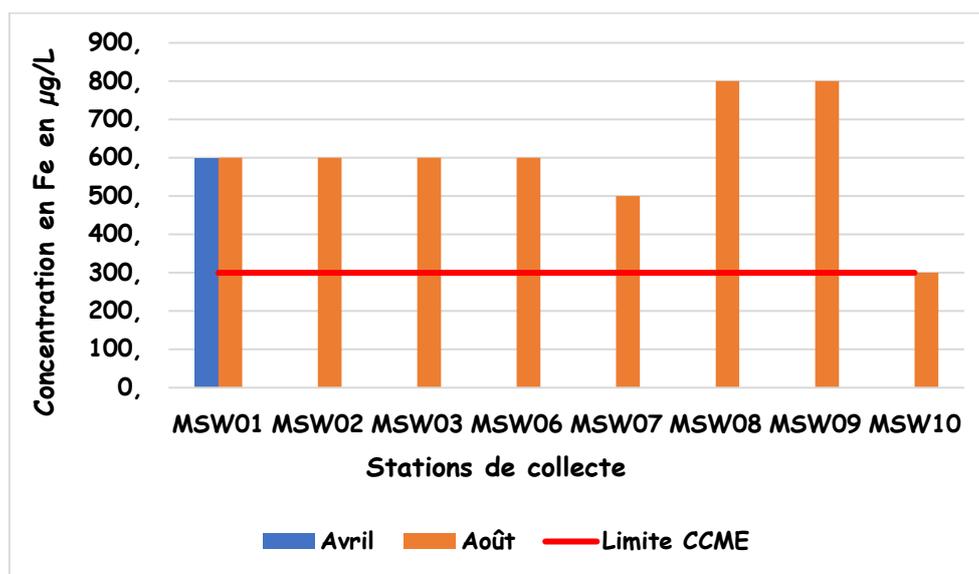


Figure 46 : Concentrations en Fer des eaux de surface échantillonnées

Ces fortes valeurs en Fe pourraient avoir pour origine la nature des terrains traversés et le pluviolessivage des minéraux ferromagnésiens des terrains latéritiques contenus dans la zone d'étude. En effet, les travaux de Fall (2016), ont montré que le permis Kanoumba est constitué de 41% de zones latéritiques, 44% de fenêtres érosionnelles et de 15% de zones dépositionnelles. La plus grande partie de la zone latéritique est confinée dans la partie orientale du permis. Ce qui pourrait être lié à la forte concentration en fer retrouvée pour la station MSW09 (située dans la partie orientale du permis). Pour Diop (2019), au-delà d'un certain seuil, le fer peut altérer l'acceptabilité de l'eau comme boisson (en modifiant les propriétés organoleptiques de l'eau) et compromettre le bon fonctionnement des écosystèmes aquatiques. Selon le CCME (2008) dans de pareilles eaux, une concentration en fer dépassant 300 µg/L pourrait affecter le bon développement des espèces aquatiques.

▪ Mercure

Dans le permis Kanoumba, les concentrations en Hg des eaux de surface sont relativement faibles. Durant, le mois d'Août toutes les eaux échantillonnées ont une concentration de 0,1

$\mu\text{g/L}$ (fig. 46). Le CCME recommande une valeur de $0,1 \mu\text{g/L}$ dans les eaux ambiantes. Alors qu'en Avril, le fleuve Gambie à Mako enregistre une concentration $4,5 \mu\text{g/L}$ largement au-dessus de cette valeur recommandée par le CCME.

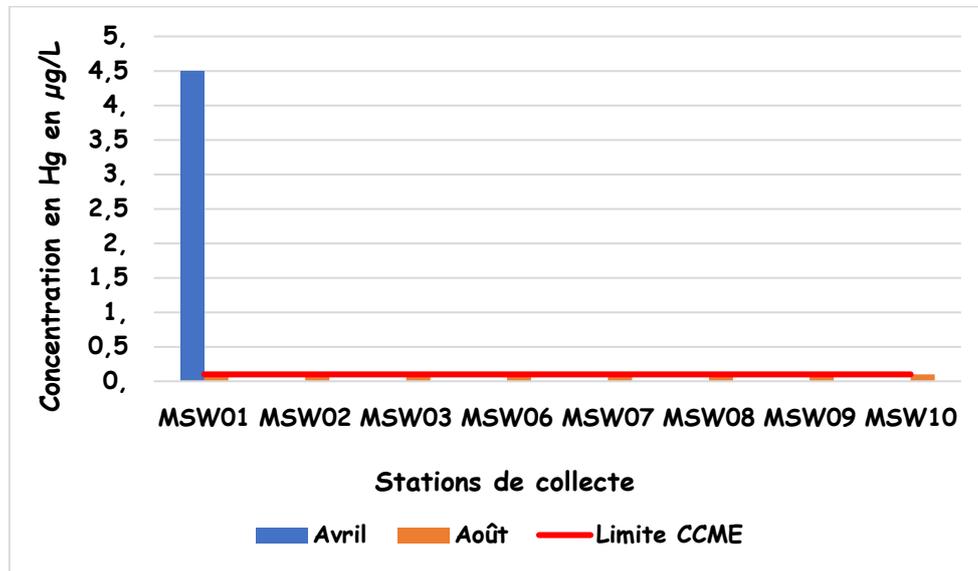


Figure 47 : Concentrations en Hg des eaux de surface échantillonnées

Comme pour les eaux souterraines, cette forte concentration en Hg enregistrée pour le fleuve Gambie situé hors du permis Kanoumba durant le mois d'avril (saison sèche) pourrait confirmer le caractère anthropogénique de son introduction dans l'écosystème aquatique et des phénomènes de dilution dans la période de crues. Selon le PAN (2018), des activités d'orpaillage avec utilisation du Hg sont effectués dans le fleuve Gambie. De surcroît, la proximité de Bantako considéré comme l'un des plus grands villages d'exploitation artisanale et à petite échelle d'or pourrait être l'origine probable de cette forte concentration en Hg pour le fleuve Gambie. Toutefois, nous remarquons que les concentrations obtenues sont plus importantes pour les eaux de surface que pour les eaux souterraines. En effet, les eaux de surface étant plus exposées que les eaux souterraines aux activités d'orpaillage ceci pourrait expliquer les plus fortes concentrations notées dans ces dernières. Bien que les concentrations en Hg des cours situés à l'intérieur du permis Kanoumba soient en dessous de la valeur guide du CCME, le cinquième rapport du centre de suivi écologique montre que sa seule présence constitue une menace pour la santé publique, compte tenu de son pouvoir d'accumulation dans la chaîne trophique (CSE, 2015).

▪ Plomb

Les apports de plomb au milieu aquatique se font majoritairement par voie atmosphérique, la source principale étant, à l'heure actuelle, la combustion des énergies fossiles (Chiffolleau, 2001 ; Fairbrother et *al.*, 2007). Dans les eaux du permis Kanoumba, les concentrations des eaux de surface en Pb sont relativement faibles. Elles varient de 0,5 à 0,7 $\mu\text{g/L}$ en Août avec une valeur médiane de 0,5 $\mu\text{g/L}$ (fig. 48). Alors qu'en Avril, le fleuve Mako enregistre une valeur de 9,4 $\mu\text{g/L}$ largement au-dessus de la recommandation du CCME (2008).

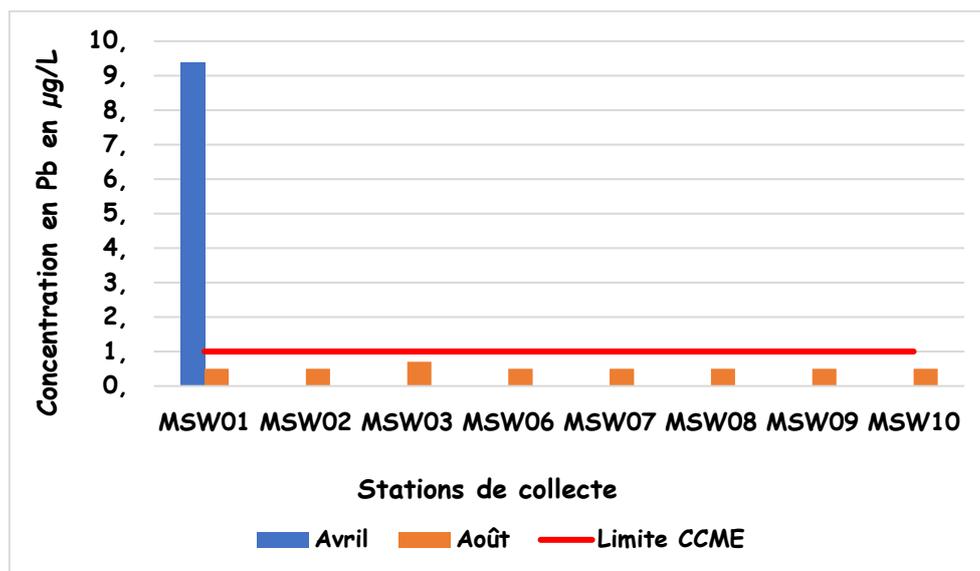


Figure 48 : Concentrations en Pb des eaux de surface échantillonnées

Cette forte concentration pourrait avoir des conséquences néfastes sur la faune aquatique particulièrement sur les espèces de poissons. Se référant aux travaux de Lesven (2008), à partir de 0,5 $\mu\text{g/L}$ de Pb inorganique en milieu aquatique, on observe un retard de croissance chez le phytoplancton. De plus, les niveaux de bioaccumulation chez les organismes aquatiques engendrent, à terme, une plus forte toxicité pour l'homme qui se situe en bout de chaîne alimentaire (Chiffolleau, 2001 ; Fairbrother et *al.*, 2007).

▪ Zinc

Les concentrations en Zn des eaux de surface sont relativement faibles. Elles varient de 9 à 41 $\mu\text{g/L}$ avec une valeur médiane de 14,5 $\mu\text{g/L}$ en Août alors qu'en Avril la station de Mako MSW01 enregistre une concentration de 6 $\mu\text{g/L}$ (fig. 49). La rivière de Tinkoto présente une valeur relativement élevée largement au-dessus de la recommandation du CCME fixée 30 $\mu\text{g/L}$. Cette valeur élevée de la concentration en Zn dans la rivière de Tinkoto pourrait avoir pour origine les intenses activités d'exploitation artisanale d'or qui ont lieu dans la zone. En effet, le Zn entre dans le procédé de cyanuration de l'or pour enrober ce dernier. Après récupération

finale de l'or, les résidus miniers contenant du Zn et de l'Al sont rejetés directement dans la nature ce qui contribue à l'augmentation des concentrations de Zn dans les eaux. D'ailleurs, Diop (2018) et Diawara (2018) ont signalé l'utilisation de Zn dans la zone.

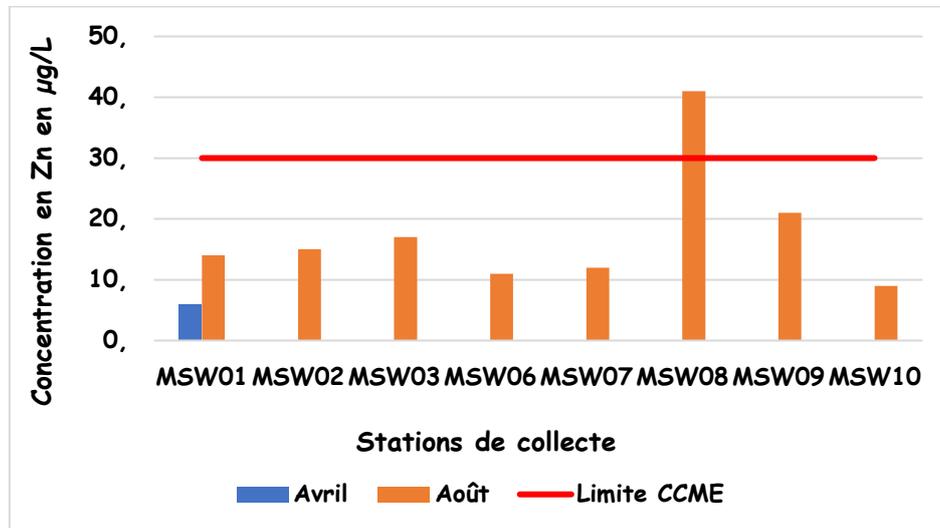


Figure 49 : Concentrations en Zn des eaux de surface échantillonnées

4. Conclusion partielle

Ce chapitre a permis de faire la caractérisation hydrochimique et l'évaluation de la qualité des eaux du permis Kanoumba. L'étude hydrochimique réalisée dans le permis Kanoumba a permis de distinguer trois (03) hydrofaciès :

- **un faciès bicarbonaté calcique magnésien**, largement dominant dans la zone d'étude ;
- **un faciès bicarbonaté sodique et potassique ; et**
- **un faciès chloruré sodique et potassique.**

L'évaluation de la qualité des eaux souterraines et de surface dans le permis Kanoumba a permis de connaître que :

- les eaux sont légèrement acides à neutres avec un caractère peu minéralisé donc douces ;
- le fer et l'Al sont les plus représentés parmi les ETM ;
- les fortes concentrations en Sb et en Ar sont des contaminations géogénique et donc liées au contexte géologique et structural de la zone d'étude ;
- la turbidité est 18 fois plus importante dans les eaux de surface que dans les eaux souterraines et plus marquante durant la saison des pluies ;
- la pollution en mercure est liée aux activités anthropiques. Les plus fortes valeurs sont enregistrées durant le mois d'Avril correspondant à la période où l'activité est à son paroxysme.

CONCLUSION GENERALE

La présente étude a pour principal objectif de contribuer à améliorer la connaissance de la qualité des ressources en eaux souterraines et de surface en zone de socle cristallin du Sénégal. Elle a été réalisée à partir de la combinaison de recherche bibliographique, des campagnes d'échantillonnage (eaux souterraines et de surface) réalisées sur le terrain, des analyses de laboratoire et des méthodes hydro-chimiques nécessitant l'utilisation de certains outils pour le traitement des données. La caractérisation hydrologique et hydrogéologique a permis de connaître que dans la zone d'étude :

- le chevelu hydrographique est assez dense ; et
- il n'y a pas d'aquifère généralisé mais des aquifères discontinus à semi-continus.

La caractérisation hydrochimique du permis Kanoumba a permis d'identifier trois groupes d'eau à savoir les eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes, les plus représentées des hydro-faciès rencontrés dans la zone d'étude. Les eaux bicarbonatées sodiques et potassiques, les eaux chlorurées sodiques et potassiques qui sont les moins représentées.

Les résultats des analyses des eaux échantillonnées comparées aux valeurs guide de l'organisation mondiale de la santé (OMS, 2017) pour l'eau potable et du conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME, 2008) pour les eaux de surface mettent en évidence :

- des eaux souterraines et de surface légèrement acide à neutre avec un degré de minéralisation relativement faible ;
- une turbidité des eaux de surface 18 fois plus importante que celle des eaux souterraines ;
- une pollution métallique des eaux souterraines en Al, Fe, As, Sb, Hg et Pb ; et
- une pollution métallique des eaux souterraines et de surface en Al, Fe, Sb, Hg, Cr, Cu Pb et en Zn.

Le Fer et l'Al sont les plus représentés dans toutes les eaux (surface et souterraines) avec des valeurs maximales de 1100 µg/L en Avril et de 16200 µg/L pour le Fer et de 490 µg/L en Avril et de 460 µg/L en Août pour les eaux souterraines. Alors que l'As (730 en Avril et 1700 en Août) et le Sb (1300 µg/L en Avril et 320 µg/L en Août) sont des pollutions ponctuelles pour les ouvrages localisés dans les zones minéralisées de Delya et de Massawa centrale zone et donc liées au contexte géologique local par la présence de minéraux sulfurés (pyrite et arsénopyrite) et de veines de quartz-stibine.

Une pollution en Hg est notée dans les eaux de surface et souterraines. Les plus fortes concentrations sont enregistrées durant la période de basse eaux (en Avril) autour des sites

d'exploitation artisanale d'or au moment où l'activité d'orpaillage est à son paroxysme, ce qui montre le caractère anthropogénique de cette pollution mercurielle.

Ce qui remet en cause le bon fonctionnement des écosystèmes aquatiques et l'AEP des communautés locales particulièrement celles qui vivent dans les villages de Tinkoto (MGW07), Kanouméring (MGW03 et MGW04) et du Camp de Massawa (MGW02 et MGW17).

PERSPECTIVES

Les résultats obtenus sont certes très intéressants mais méritent d'être complétés par d'autres investigations notamment :

- une étude détaillée des impacts sanitaires et environnementaux de l'Arsenic et de l'Antimoine ;
- une étude de la qualité bactériologique des eaux souterraines du permis Kanoumba ;
- une étude de la vulnérabilité des ressources hydrologiques et hydrogéologiques situées dans le permis Kanoumba par rapport à une ouverture de mine ; et
- une étude du potentiel drainage minier acide vers les zones de Massawa centrale zone et Delya. Etant donné que dans ces zones, la minéralisation est en association avec des minéraux sulfurés notamment (arsénopyrite, la pyrite, la stibine) avec un pH des eaux légèrement acide à neutre. Pendant l'exploitation minière si les roches exposées ou stockées contiennent des minéraux sulfurés réactifs et que les matériaux environnants ne peuvent pas maintenir une capacité tampon, un drainage acide des roches et une lixiviation des métaux peuvent se produire.

BIBLIOGRAPHIE

- ANSD. 2013. « Situation économique et sociale du Sénégal ». Rapport d'étude. Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie, 14p.
- Aranguren, Matías Miguel Salvarredy. 2008. « Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers. Approches géochimique, minéralogique et hydrochimique ». Université Toulouse III, 489p.
- Attal, Eveline. 2005. « Comportements à risque de pollution mercurielle pour la santé et l'environnement liés à l'amalgame dentaire : Enquête auprès de 69 cabinets dentaires. » Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 106p.
- Babayé, Maman Sani Abdou. 2012. « Evaluation des ressources en eau souterraines dans le bassin de Dargol (Liptako - Niger) ». Thèse de Doctorat, Belgique : Université de Liège (Belgique), 265p.
- Bamba, Yacouba. 2012. Evaluation des impacts de l'exploitation de la mine d'or de Bonikro (Cote d'Ivoire) sur les ressources en eau. Mémoire de Master en Ingénierie de l'eau et de l'Environnement. Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement (IIEE), 55p.
- Baron, Catherine., Bonnassieu, Alain., 2011. Les enjeux de l'accès à l'eau en Afrique de l'Ouest : diversité des modes de gouvernance et conflits d'usages. *Mondes En Dév.* n°156, 17. <https://doi.org/10.3917/med.156.0017>
- Barry, Mamadou Hafiziou, 2009. L'eau, source de conflits: cas de la Guinée, quelles approches de solutions? Mémoire de Master en gestion intégrée des ressources en eau. Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement (IIEE), https://www.memoireonline.com/10/12/6229/m_L-eau-source-de-conflits-cas-de-la-Guinee-queelles-approches-de-solutions2.html
- Belksier, Mohamed.Salah., Chaab, Salah., Abour, Fella., 2016. Qualité hydro chimique des eaux de la nappe superficielle dans la région de l'Oued Righ et évaluation de sa vulnérabilité à la pollution. *Synthèse Rev. Sci. Technol.* 32, 42–57.
- Bounouira, Hamid. 2007. « Etude des qualités chimiques et géochimiques du bassin versant de Bouregreg ». Thèse de Doctorat, Université Ibn Tofail, 296.
- Chiffolleau, J. F. La contamination métallique, 2001, Programme scientifiques Seine-Aval. Editions Ifremer, 39p.
- Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement (2008). Recommandations pour la qualité des eaux au Canada. 1717.
- Corine Tarits, Mathieu Benoit, Martial Caroff, Jean-Pierre Réhault, Joel Rolet, Pierre Thonon, Chantal Tisseau, Bruno Wirtz. 2002. « Géologie de l'environnement ». Dunod, Paris, ISBN 210005970X, 198p.
- Creasy Charles, 2018. Baseline surface water quality within and around the project site. Study report Digby Wells Environmental, 16p.

- CSE. 2010. « Quatrième rapport national sur la mise en œuvre de la convention nationale sur la diversité biologique. » Centre de Suivi Ecologique, 132p.
- CSE 2015. « CSE_3ème Edition du Rapport sur l'Etat de l'Environnement_2015.pdf ». Troisième édition. Sénégal : Centre de Suivi Ecologique, 199p.
- Daget, Jacques. 1960. « La faune ichthyologique du bassin de la Gambie » A (2) : 10p.
- Diawara, Ousseynou. 2018. « Problématique de la gestion des produits chimiques dans les sites d'orpaillage au Sénégal Oriental (Cas du village aurifère de Kharakhèna) ». Mémoire de master. Dakar : Université Cheikh Anta Diop, 89p.
- Dioh, Edmond, J M Bertrand, P Debat, A Dia', Pape Malick Ngom', et G Rocci. 1999. « Évolution des formations volcaniques birimiennes de la partie nord de la boutonnière de Kédougou (Sénégal oriental) » 01 : 7p.
- Diop, Mor. 2019. « Etude des impacts de l'exploitation de l'or sur les ressources en eau dans le bassin du fleuve Gambie au niveau de Sabodala et environs ». Mémoire de master. Dakar : Université Cheikh Anta Diop, 109p.
- DEEC, 2019. Plan d'action national visant à réduire, et si possible éliminer, l'utilisation du mercure dans l'extraction minière artisanale et à petite échelle d'or au Sénégal. Rapport technique. Direction de l'Environnement et des Etablissements Classés, 76p.
- Fall, Mor, 2016. Estimation des ressources et analyse comparative de la récupération dans les blocs de la zone centrale du gisement d'or de Massawa (Permis de Kanoumba-Sénégal oriental). Mémoire d'ingénieur géologue de conception IST-UCAD, 112p.
- Fairbrother, Anne, Randall Wenstel, Keith Sappington, et William Wood. 2007. « Framework for Metals Risk Assessment ». *Ecotoxicology and Environmental Safety* 68 (2) : 145-227. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2007.03.015>.
- FEPS. 2008. « FEPS (Fondation de l'eau potable Sûre), 2008, Exploitation minière et la pollution de l'eau, <http://www.safewater.org>, », 6p.
- Feybesse, Jean-Louis, Mario Billa, Catherine Guerrot, Emmanuel Duguey, Jean-Luc Lescuyer, Jean-Pierre Milesi, et Vincent Bouchot. 2006. « The paleoproterozoic Ghanaian province: Geodynamic model and ore controls, including regional stress modeling ». *Precambrian Research* 149 (3-4) : 149-96. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.06.003>.
- Ghanem, Carine ABI. 2008. « Spéciation des trois éléments trace Mercure, Plomb et Cadmium dans les sédiments marins des zones côtières libanaises. » l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech), 313p.
- Gueye, M, S Siegesmund, K Wemmer, S Pawlig, M Drobe, et N Nolte. 2007. « New evidences for an early Birimian evolution in the West Africa Craton: An example from the Kédougou Kéniéba inlier, southeast Senegal », *Geological society of South africa*, 14p.
- INERIS. 2006. « Eléments traces métalliques : Guide méthodologique. » Rapport d'études INERIS-DRC-06-66246/DESPR01a, 106p.

- Lachassagne Patrick. et Wyns Robert., 2005. Aquifères de socle: nouveaux concepts Application à la prospection et la gestion de la ressource en eau. Géosciences, 2, pp. 32-37.
- Lesven, Ludovic. 2008. « Devenir des éléments traces métalliques au sein du sédiment, un compartiment clé de l'environnement aquatique. » Thèse de Doctorat, Lille : Université des Sciences et Technologies de Lille, 246p.
- Mall, Ibrahima. 2017. « Evaluation des ressources en eau dans le Sénégal oriental : Apports des outils Géochimiques, Géostatistiques, de la Télédétection et des SIG. » Thèse de Doctorat, Dakar : Université Cheikh Anta Diop, 232p.
- Manlius, N, F Battaglia-Brunet, et C Michel. 2009. « Pollution des eaux par l'arsenic et acceptabilité des procédés de bio traitement. BRGM/RP-57640-FR, 173p. , 26 fig., 5 tabl. , 9 ann. »
- Matini, L, J.M Moutou, et M.S Kongo-Mantono. 2010. « Evaluation hydro-chimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud-Ouest de Brazzaville, Congo ». Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie 5 (1) : 17p. <https://doi.org/10.4314/afsci.v5i1.61709>.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement de la faune et des Parcs (MDDEFO), 2013. Critère de qualité de l'eau de surface, 3e édition, Québec, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ISBN 978-2-550-68533-3 (PDF), 536p.
- Mombo, Stéphane. 2016. « Transferts des métaux et métalloïdes dans le système sol-plante-atmosphère : mécanismes biogéochimiques et conséquences environnement-santé ». Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 261p.
- Ndiaye, Pape Malick, A Dia, Y Vialette, Dinna. Pathé Diallo, Pape. Malick Ngom, M Sylla, S Wade, et Edmond Diah. 1997. « Données pétrographiques, géochimiques et géochronologiques nouvelles sur les granitoïdes du Paléoproterozoïque du Supergroupe de Dialé-Daléma (Sénégal Oriental): implications pétrogénétiques et géodynamiques. », Journal of African Earth Sciences, 25 (2) : 16p.
- Ngom, Pape Malick. 1989. « Caractères géochimiques des formations birrimiennes du supergroupe de Mako (Sabodala et ses environs) », Journal of African Earth Sciences, 8 (1) : 7p.
- Ngom, Pape Malick. 1995. « Caractérisation de la croûte birimienne dans les parties centrale et méridionale du supergroupe de Mako. Implications géochimiques et pétrogénétiques ». Thèse de Doctorat, Dakar : Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 291p.
- Niane, Birane. 2014. « Impacts environnementaux liés à l'utilisation du mercure lors de l'exploitation artisanale de l'or dans la région de Kédougou (Sénégal oriental) ». Université de Genève, 121p.
- Nouayti, Nordine, Driss Khattach, et Mohamed Hilali. 2015. « Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc) Assessment of physico-chemical quality of groundwater of the Jurassic aquifers in high basin of Ziz (Central High Atlas, Morocco) » 6 (4) : 14p.

- OMS, 2004. Directives de qualité pour l'eau de boisson. Organisation Mondiale de la Santé, Genève.
- OMS. 2017. « Directives de qualité pour l'eau de boisson : 4e éd. intégrant le premier additif [Guidelines for drinking-water quality: 4th ed. incorporating first addendum]. » Genève : Organisation mondiale de la santé, 564p.
- Ouedraogo, Moussa., 2016. 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). Université Paris Saclay.
- Painchaud, Jean., 1997. La qualité de l'eau des rivières du Québec : état et tendances ; ministère de l'environnement et de la faune, Direction des écosystèmes aquatiques, Québec, 58p.
- Pirrone, N., P. Costa, J.M. Pacyna, et R. Ferrara. 2001. « Mercury emissions to the atmosphere from natural and anthropogenic sources in the Mediterranean region ». *Atmospheric Environment* 35 (17) : 2997-3006. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00103-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00103-0).
- Proust N, Picot A. Toxicologie de l'arsenic et de ses composés : importance de la spéciation. *EMC - Pathologie professionnelle et de l'environnement* 2019 ; 0(0):1-21 [Article 16-002-A-30].
- Saoud, Ibrahim. 2014. « Contribution à l'étude hydrochimique de la nappe du Sénomien dans la région de Guerrara (Ghardaïa) ». Mémoire de master. Algérie : Université Kasdi Merbah Ouargla, 59p.
- Tourab, Hafsa. 2013. « Contribution à l'étude de la qualité physicochimique et bactériologique des eaux souterraines dans la plaine du Haouz. ». Université Cadi Ayyad Faculté des Sciences et Techniques Département des Sciences de la Terre, Marrakech, 82p.
- Wuilleumier, Arnaud, Hugo Théveniaut, Ibrahima Mall, et Pape Malick Ndiaye. 2010. « Notice explicative de la carte hydrogéologique à 1/500 000 du Sénégal oriental, Ministère des Mines, de l'Industrie, de l'Agro-Industrie et des PME, Direction des Mines et de la Géologie, Dakar, 99p »
- Youssouf, Koussoubé. 1996. « Hydrogéologie en milieu de socle cristallin du Burkina Faso. Cas du bassin versant du bas-fond de bidi (province de Yantenga) ». Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 271p.
- Quick Rodney, Bottoms Simon, Quarmby Richard, Trusler Graham E., 2018. Rapport de faisabilité du projet aurifère de Massawa, Sénégal. Randgold Resources Limited, 171p.

WEBOGRAPHIE

- <http://fr.africanews.com/2016/03/23/la-difficile-equation-de-l-eau-potable-en-afrique//> (consulté le 03/08/2018)
- http://www.who.int/water_sanitation_health/2005advocguide/fr/ (consulté le 03/08/2018)

ANNEXES

Tableau 2 : Coordonnées des points d'échantillonnage des eaux souterraines et de surface

Type	Localisation	ID	X	Y
Forage	Campement Massawa	MGW02	821842	1434321
Forage	Kanouméring	MGW03	806238	1425723
Forage	Campement Kanouméring	MGW04	807165	1425750
Forage	Mandinkhole West	MGW05	829324	1442434
Forage	Mandinkhole Est	MGW06	829483	1442502
Puit	Tinkoto North	MGW07	813070	1430314
Forage	Massawa Camp	MGW17	821811	1434249
Forage	Tinkoto South	MGW19	812417	1430011
Piézomètre	Massawa central zone	MDW01	819242	1432825
Piézomètre	Massawa central zone	MDW03	819433	1433300
Piézomètre	Sofia North forage Filimadi	SMBH01	809941	1437210
Piézomètre	Sofia Main forage Niaka	SMBH02	809228	1434676
Piézomètre	Delya zone	DDW01	830097	1448252
Piézomètre	Delya zone	DDW02	830044	1448179
Eaux surface	Fleuve Gambie à Mako	SW01	787331	1421737
Eaux surface	Confluence Niokolo au Sud du corps minéralisé de Massawa	SW02	818584	1432445
Eaux surface	Niokolo	SW03	814633	1434814
Eaux surface	Confluence Niokolo en aval du corps minéralisé de Sofia	SW06	811876	1436176
Eaux surface	Rivière de Tinkoto	MSW07	813756	1430439
Eaux surface	Rivière de Tinkoto	MSW08	812302	1429267
Eaux surface	Affluent de la Falémé au Nord-Est du corps minéralisé de Massawa	SW09	826222	1435332
Eaux surface	Marigot de Yassé	SW10	822261	1432985

Tableau 3 : Unité, limite de détection et méthode des analyses physico-chimiques et chimiques, réalisées sur les échantillons d'eau prélevés

Analyse	Unité	Limite de détection	Méthode
Turbidité	NTU	0,2	APHA2130, 22nd edition
Conductivité	µS/cm	0,5	APHA2510, 22nd edition
Ph		0,1	APHA4500H, 22nd edition
Alcalinité total (CaCO ₃)	mg/L	2	APHA2230, 22DN edition
Nitrate	mg/L	0,4	APHA ed 21th 2005, 4500
Sulfate	mg/L	1	APHA ed, 22nd 2011, 4500
Ca	mg/L	0,02	
Mg	mg/L	0,02	
Na	mg/L	0,02	
K	mg/L	0,02	
As	µg/L	0,2	ICP-MS/OES
Hg	µg/L	0,05	
Cu	µg/L	0,5	(Inductively Coupled
Zn	µg/L	2	Plasma Mass-
Cr	µg/L	0,1	Spectrometer)
Sb	µg/L	0,1	
Pb	µg/L	0,05	
Fe	µg/L	0,02	
Al	µg/L	0,01	

Annexe 1 : Données climatologiques de la région de Kédougou de 1989 à 2018

Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
7,9	9,3	9,9	9,9	8,2	4,4	2,2	1,6	1,6	2,4	4,7	6,4

Moyennes mensuelles des minima, des moyennes et des maxima de la température à Kédougou de 1989 à 2018

Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
17,8	20,7	23,8	26,2	26,2	23,9	22,2	21,9	21,5	21,8	19,5	17
34,6	37,5	39,3	40,7	38,9	35,2	32,2	31,5	32,3	34,3	35,5	34,3
26,2	29,1	31,6	33,5	32,6	29,6	27,2	26,7	26,9	28,1	27,5	25,7

Moyennes mensuelles de la pluviométrie à Kédougou de 1989 à 2018

Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
0,51	0,08	1,69	4,91	49,75	151,4	253,09	337,89	307,13	95,59	7,19	0,27

Annexe 2 : Résultats d'analyses physico-chimiques et chimiques campagne d'échantillonnage Avril 2018 des eaux souterraines

Résultats campagne d'échantillonnage Avril 2018

Sample_ID	Turbidité	pH	Conductivité	NO ³⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ³⁻	Cl ⁻
	NTU		μS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
MGW02	0,3	6,6	291	0,4	1,	25,	18,3	9,4	0,5	186,	1,
MGW03	0,4	7,6	378	0,4	1,	43,	16,5	14,	0,6	241,	1,
MGW04	1,2	6,6	274	7,96	1,	28,	12,8	10,1	0,3	155,	2,
MGW05	0,2	7,1	487	11,4	22,	34,	16,7	44,1	1,	225,	17,
MGW06	0,2	7,1	350,	0,4	2,	17,	14,4	45,3	1,1	215,	1,
MGW07	20,3	6,6	109	1,29	1,	14,	1,5	3,8	2,3	57,	1,
MGW17	1,6	7,	403	0,4	1,	32,	22,2	21,8	0,7	262,	1,
MGW19	0,5	6,3	118	0,51	1,	7,	3,4	10,3	3,5	65,	1,
SMBH01	0,8	6,5	148	0,4	1,	12,	10,	6,	0,1		
SMBH02	0,2	7,1	740	0,4	5,	67,	55,2	11,9	0,3		
MDW01	0,5	7,1	490	0,4	11,	51,	19,6	27,8	1,1		
MDW03	0,7	7,2	438	0,68	19,	45,	18,2	26,9	1,6		
Médiane	0,5	7,05	364	0,4	1	30	16,6	12,95	0,85	200,5	1
Min	0,2	6,3	109	0,4	1	7	1,5	3,8	0,1	57	1
Max	20,3	7,6	740	11,4	22	67	55,2	45,3	3,5	262	17
Limite OMS	5	6,5 – 8,5	1300	50	200	100	100	200	N.A	N.A	N.A

Annexe 3 : Résultats d'analyses physico-chimiques et chimiques campagne d'échantillonnage Août 2018 des eaux souterraines

Résultats campagne d'échantillonnage Août 2018											
Sample_ID	Turbidité	pH	Conductivité	NO ³⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ³⁻	Cl ⁻
	NTU		μS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
MGW02	0,8	6,6	296	0,4	1,	24,	16,5	18,2	0,8	197,	1,
MGW03	12,	6,5	213,	11,3	1,	19,	8,6	7,2	0,2	118,	3,
MGW04	0,3	8,3	349,	0,4	1,	37,	13,8	12,2	0,4	232,	1,
MGW05	0,3	7,1	473	17,8	21,	32,	14,9	41,8	1,	222,	21,
MGW06	7,7	6,8	246	27,5	1,	9,	7,8	29,4	1,4	107,	10,
MGW07	7,5	6,1	235	31,7	9,	11,	2,8	26,7	9,5	39,	30,
MGW17	4,4	7,	391	1,8	1,	28,	18,4	24,6	0,9	264,	1,
MGW19	0,2	6,4	116	0,52	1,	7,	3,	15,8	3,5	71,	1,
SMBH01	31,5	6,2	93	7,64	3,	7,	4,9	10,7	1,1		
SMBH02	2,1	7,	740	0,42	8,	76,	56,9	19,6	0,8		
MDW01	1,3	7,2	457	0,4	15,	47,	16,2	28,2	1,2		
MDW03	1,3	7,2	447	0,4	15,	43,	20,1	25,1	1,3		
DDW01	84,3	7,	697	0,4	1,	74,	38,1	23,1	1,2		
DDW02	151,	7,	761	0,4	1,	70,	42,8	34,7	1,9		
Médiane	3,25	7	370	0,47	1	30	15,55	23,85	1,15	157,5	2
Min	0,2	6,1	93	0,4	1	7	2,8	7,2	0,2	39	1
Max	151	8,3	761	31,7	21	76	56,9	41,8	9,5	264	30
Limite OMS	5	6,5 – 8,5	1300	50	200	100	100	200	N.A	N.A	N.A

Annexe 4 : Résultats d'analyses des ETM campagne d'échantillonnage Avril 2018 des eaux souterraines

Résultats campagne d'échantillonnage Avril 2018									
Sample_ID	As	Hg	Cu	Zn	Pb	Cr	Sb	Fe	Al
	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
MGW02	1,4	0,1	1	76	1,3	4	0,1	400	100
MGW03	1	1,8	1	7	27	2	7,8	300	70
MGW04	0,5	0,1	1	9	0,5	3	0,1	800	50
MGW05	0,5	0,1	1	24	0,8	3	0,1	400	150
MGW06	50	0,1	10	100	0,9	7	5,3	100	90
MGW07	0,5	0,1	1	5	0,5	3	0,1	1100	490
MGW17	3,2	0,1	1	5	0,5	4	0,1	200	30
MGW19	0,5	0,9	1	5	2,5	6	5,4	100	40
SMBH01	0,5	0,1	1	38	3	3	0,1	100	80
SMBH02	0,5	2	1	5	5,7	5	21	100	50
MDW01	730	1,6	1	16	47	4	1300	400	90
MDW03	230	0,1	1	13	3,1	2	240	200	110
Mediane	0,75	0,1	1	11	1,9	3,5	2,7	250	85
Min	0,5	0,1	1	5	0,5	2	0,1	100	30
Max	730	2	10	100	47	7	1300	1100	490
Limite OMS	10	1	2000	3000	10	50	20	300	200

Annexe 5 : Résultats d'analyses des ETM campagne d'échantillonnage Août 2018 des eaux souterraines

Résultats campagne d'échantillonnage Août 2018									
Sample_ID	As	Hg	Cu	Zn	Pb	Cr	Sb	Fe	Al
	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
MGW02	3,5	0,1	11	19	3,7	11	1,3	300	230
MGW03	0,5	0,1	11	150	1	7	0,1	2700	30
MGW04	3,7	0,1	6	12	0,5	6	0,2	100	30
MGW05	1,1	0,1	8	51	0,5	9	0,1	200	130
MGW06	29	0,1	17	28	2,6	10	0,3	100	200
MGW07	0,8	1	9	31	0,5	6	2,1	100	170
MGW17	5,4	0,1	5	40	0,5	5	0,1	1600	160
MGW19	0,5	0,1	4	9	0,5	9	0,1	100	90
SMBH01	0,5	0,1	8	31	0,5	9	0,1	400	460
SMBH02	2	0,1	10	21	0,5	9	0,3	200	30
MDW01	840	0,1	10	47	5,8	9	320	100	30
MDW03	1700	0,1	8	36	2,9	8	310	400	30
DDW01	260	0,1	5	260	0,5	6	0,1	3000	30
DDW02	1100	0,1	8	18	4,7	8	2	16200	30
Mediane	3,6	0,1	8	31	0,5	8,5	0,25	250	60
Min	0,5	0,1	4	9	0,5	5	0,1	100	30
Max	1700	1	17	260	5,8	11	320	16200	460
Limite OMS	10	1	2000	3000	10	50	20	300	200

Annexe 6 : Résultats d'analyses ETM des campagnes d'échantillonnage Avril et Août 2018 des eaux surface

Sample_ID	Turbidité (NTU)	pH	Conductivité ($\mu\text{S/cm}$)	As $\mu\text{g/L}$	Hg $\mu\text{g/L}$	Cu $\mu\text{g/L}$	Zn $\mu\text{g/L}$	Pb $\mu\text{g/L}$	Cr $\mu\text{g/L}$	Sb $\mu\text{g/L}$	Fe $\mu\text{g/L}$	Al $\mu\text{g/L}$
Avril												
MSW01	1,9	7,	870	1,9	4,5	1,	6,	9,4	6,	63,	600,	170,
Août												
MSW01	55,2	7,2	490	0,5	0,1	7,	14,	0,5	8,	0,1	600,	170,
MSW02	171,	6,8	270	0,5	0,1	8,	15,	0,5	7,	0,1	600,	420,
MSW03	57,2	6,9	310	0,5	0,1	7,	17,	0,7	8,	0,1	600,	490,
MSW06	127,	7,	500	0,8	0,1	8,	11,	0,5	7,	0,1	600,	380,
MSW07	45,6	6,4	270	0,6	0,1	7,	12,	0,5	8,	3,6	500,	260,
MSW08	56,9	6,6	610	1,9	0,1	8,	41,	0,5	8,	0,9	800,	370,
MSW09	63,5	7,	500	0,7	0,1	19,	21,	0,5	7,	0,3	800,	490,
MSW10	30,6	6,1	180	0,5	0,1	7,	9,	0,5	8,	0,1	300,	330,
Mediane	57,05	6,85	400	0,55	0,1	7,5	14,5	0,5	8	0,1	600	375
Min	30,6	6,1	180	0,5	0,1	7	9	0,5	7	0,1	300	170
Max	171	7,2	610	1,9	0,1	19	41	0,7	8	3,6	800	490
Limite CCME		6,5 - 9		50		2	30	1	2		300	100

TABLE DES MATIERES

DEDICACES	VI
REMERCIEMENTS.....	VII
RESUME.....	XI
ABSTRACT	XII
INTRODUCTION GENERALE.....	1
Contexte de l'étude.....	1
CHAPITRE 1 : PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE	4
1.1. Situation géographique	4
1.2. Climat	4
1.2.1. Précipitations	5
1.2.2. Température	6
1.2.3. Ecart pluviométrique	6
1.2.4. Evaporation.....	7
1.3. La géomorphologie	8
1.3.1. Le relief.....	8
1.3.2. Pentes.....	9
1.4. Hydrographie.....	10
1.5. Végétation, Flore et Faune.....	11
1.5.1. Végétation et Flore	11
1.5.2. Faune	12
1.6. Populations et activités socio-économiques	13
1.7. Conclusion partielle.....	14
CHAPITRE 2 : CONTEXTE GEOLOGIQUE, HYDROLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE.....	15
2.1. Cadre géologique	15
2.1.1. Craton Ouest-africain	15
2.1.2. Boutonnière de Kédougou-Kéniéba.....	15
2.1.2.1. Super groupe de Mako.....	16
2.1.2.2. Supergroupe de Dialé-Daléma.....	16
2.2. Géologie de la zone d'étude	18
2.2.1. Lithologie, altérations et structures	18
2.2.2. Présentation des systèmes de minéralisation.....	18
2.3. Hydrologie et hydrogéologie de la zone d'étude	20
2.3.1. Hydrologie de la zone d'étude	20

2.3.1.1.	Gambie	21
2.3.1.2.	Niokolo-Koba	21
2.3.1.3.	Falémé.....	22
2.3.1.4.	Hydrogéologie de la zone d'étude	22
2.3.1.5.	Réservoir supérieur d'altérites.....	23
2.3.1.6.	Réservoir de fissures	24
2.3.1.7.	Réservoirs de failles ou de fractures majeures	24
2.4.	Conclusion partielle.....	24
CHAPITRE 3 : MATERIEL ET METHODES		25
3.1.	Phase de prospection	25
3.1.1.	Stations d'échantillonnage.....	25
3.1.2.	Réseau d'échantillonnage	26
3.2.	Phase de collecte de données.....	28
3.2.1.	Echantillonnage	28
3.2.1.1.	Matériel d'échantillonnage	28
3.2.1.2.	Méthodologie d'échantillonnage	28
3.2.2.	Conditionnement et Conservation des échantillons	29
3.2.3.	Contrôle qualité de l'échantillonnage.....	30
3.2.4.	Paramètres étudiés	30
3.2.5.	Acquisition des images et données cartographiques	31
3.3.	Phase de traitement des données.....	31
3.3.1.	Outils de traitement des données	31
3.3.2.	Qualité des analyses.....	32
3.3.3.	Traitement des images et données cartographiques.....	32
3.4.	Conclusion partielle.....	33
CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION		34
4.1.	Introduction	34
4.2.	Evaluation de la qualité des ressources en eau	34
4.2.1.	Eaux souterraines	34
4.2.1.1	Caractérisation physico-chimique	34
4.2.1.2	Caractérisation chimique.....	37
❖	Ions majeurs.....	41
❖	Eléments traces métalliques.....	47
4.2.2.	Eaux de surface.....	57

4.2.2.1	Caractéristiques physico-chimiques	57
4.2.2.2	Caractéristiques chimiques.....	60
❖	Ions majeurs.....	60
❖	Eléments traces métalliques.....	61
4.	Conclusion partielle.....	68
	CONCLUSION GENERALE	69
	PERSPECTIVES.....	70
	BIBLIOGRAPHIE	71
	ANNEXES.....	75

ANNEXES

Annexe 1 :	Données climatologiques de la région de Kédougou de 1989 à 2018	77
Annexe 2 :	Résultats d'analyses physico-chimiques et chimiques campagne d'échantillonnage Avril 2018 des eaux souterraines.....	78
Annexe 3 :	Résultats d'analyses physico-chimiques et chimiques campagne d'échantillonnage Août 2018 des eaux souterraines.....	79
Annexe 4 :	Résultats d'analyses des ETM campagne d'échantillonnage Avril 2018 des eaux souterraines.....	80
Annexe 5 :	Résultats d'analyses des ETM campagne d'échantillonnage Août 2018 des eaux souterraines.....	81
Annexe 6 :	Résultats d'analyses ETM des campagnes d'échantillonnage Avril et Août 2018 des eaux surface	82