

Suivi spatio-temporel de la turbidité des eaux du lac de Guiers (Sénégal) par télédétection optique : Apport des indices TSM et TSS dérivés des images Sentinel-2

Spatio-temporal monitoring of water turbidity in Lake Guiers (Senegal) using optical remote sensing: Contribution of TSM and TSS indices derived from Sentinel-2 imagery

¹TOURE Labaly

Résumé

La qualité des eaux continentales représente un enjeu environnemental crucial, en particulier dans les régions arides comme le Sahel, où les ressources hydriques sont à la fois limitées et soumises à de fortes pressions anthropiques. Dans ce contexte, la gestion durable de l'eau douce revêt une importance stratégique. Cette étude propose une évaluation spatio-temporelle de la turbidité des eaux du lac de Guiers, principal réservoir d'eau douce du nord du Sénégal, à partir des images optiques Sentinel-2 acquises tout au long de l'année 2024. Deux indices empiriques – la Matière en Suspension Totale (TSM) et les Solides en Suspension Totaux (TSS) – ont été calculés à partir des réflectances de surface afin de caractériser les dynamiques mensuelles de la turbidité.

Les résultats révèlent une forte variabilité saisonnière, avec des niveaux maximaux de turbidité observés entre août et octobre, atteignant en moyenne 45 mg/L pour le TSM et 52 mg/L pour le TSS, en lien avec l'intensification des précipitations et les apports terrigènes et anthropiques. À l'inverse, la période de décembre à avril présente les niveaux les plus faibles, inférieurs à 20 mg/L.

Cette approche confirme la pertinence de la télédétection optique comme outil efficace, régulier et peu coûteux pour le suivi des paramètres de qualité des eaux intérieures, en particulier dans les régions mal desservies par les réseaux de mesures in situ.

Mots clés : Lac de Guiers, Qualité des eaux, Turbidité, Google earth engine, Sentinel-2

Abstract

The quality of inland waters is a major environmental concern, particularly in arid regions such as the Sahel, where water resources are both limited and under significant anthropogenic pressure. In this context, the sustainable management of freshwater is of strategic importance. This study presents a spatio-temporal assessment of water turbidity in Lake Guiers, the main freshwater reservoir in northern Senegal, using Sentinel-2 optical imagery acquired throughout the year 2024. Two empirical indices – Total Suspended Matter (TSM) and Total Suspended Solids (TSS) – were derived from surface reflectance data to characterize monthly turbidity dynamics.

The results reveal strong seasonal variability, with peak turbidity levels occurring between August and October, reaching average values of 45 mg/L for TSM and 52 mg/L for TSS, linked to increased rainfall and terrestrial and anthropogenic inputs. In contrast, the period from December to April shows the lowest levels, below 20 mg/L.

This approach confirms the relevance of optical remote sensing as an efficient, regular, and cost-effective tool for monitoring inland water quality parameters, particularly in areas with limited access to in-situ measurements.

Key words: Guiers Lake, Water quality, Turbidity, Google earth engine, Sentinel-2, Senegal

Introduction

La gestion durable des ressources en eau douce constitue un enjeu crucial à l'échelle mondiale, en particulier dans les régions arides et semi-arides comme le Sahel, où la pression croissante sur les écosystèmes aquatiques résulte à la fois des changements climatiques et des activités anthropiques. Dans ce contexte, la qualité de l'eau des plans d'eau continentaux fait l'objet d'une attention accrue, en raison de son rôle vital pour l'approvisionnement domestique, l'agriculture, la pêche et la conservation de la biodiversité.

Le lac de Guiers, situé au nord du Sénégal, est un réservoir d'eau douce stratégique alimentant notamment la capitale Dakar via la Société Nationale des Eaux du Sénégal (SONES). Il joue également un rôle fondamental pour les activités agro-pastorales locales et pour le maintien de zones humides d'importance écologique (M. B. SAGNA, 2015, p. 412). Toutefois, cette ressource hydrique est soumise à de multiples pressions : intensification des pratiques agricoles, urbanisation croissante, apport de polluants, et altérations du régime hydrologique (J. L. FALL et al., 2018, p. 921).

Les méthodes classiques de suivi de la qualité de l'eau, basées sur des prélèvements in situ, bien que précises, sont souvent limitées en termes de fréquence et de couverture spatiale. Dans ce cadre, la télédétection optique apparaît comme un outil complémentaire prometteur, permettant une surveillance régulière, extensive et à moindre coût des variables de qualité des eaux de surface (N. PAHLEVAN, et al., 2017, p. 601).

La mission Sentinel-2, grâce à ses capteurs multispectraux MSI, offre des données à haute résolution temporelle (5 jours) et spatiale (10 à 60 m), particulièrement adaptées au suivi des eaux intérieures (Q. VANHELLMONT et K. RUDDICK, 2016, p. 55).

L'intérêt de Sentinel-2 réside dans ses bandes spectrales centrées sur les domaines du visible et du proche infrarouge, sensibles à la diffusion des particules en suspension dans l'eau (N. PAHLEVAN et al., 2017, p. 601). Cette propriété optique permet d'estimer efficacement des paramètres de qualité de l'eau, tels que la matière totale en suspension (TSM) et les solides en suspension totaux (TSS), par télédétection (B. NECHAD et al., 2010, p. 854; C. ZHANG et al., 2022, p. 4446). X. LI et al. (2019, p. 46165) ont montré que l'utilisation conjointe des bandes du visible et du proche infrarouge de Sentinel-2 permettait une estimation fiable des matières en suspension dans des plans d'eau intérieurs. De plus, des outils dédiés à la correction atmosphérique des images Sentinel-2 et Landsat, ont été spécifiquement développés pour des applications aquatiques, soulignant la pertinence de ces bandes pour l'analyse de la turbidité (Q. VANHELLMONT et K. RUDDICK, 2016, p. 55).

Grâce aux avancées en traitement cloud et à la disponibilité croissante d'images satellitaires haute résolution, Google Earth Engine (GEE) s'impose aujourd'hui comme une plateforme incontournable pour l'analyse spatio-temporelle de la qualité de l'eau, en particulier la turbidité. GEE permet un accès simplifié à de vastes archives de données satellites (Sentinel-2, Landsat, MODIS), ainsi que le traitement à grande échelle de séries temporelles via des scripts personnalisables. Des travaux récents ont montré que les algorithmes de régression appliqués aux bandes Sentinel-2 via GEE peuvent offrir des résultats très précis (M. K. KOLLI et P. CHINNASAMY, 2024, p. 33837). En intégrant des techniques d'apprentissage automatique, la plateforme permet également d'améliorer l'estimation de la turbidité par des approches hybrides, tout en assurant la reproductibilité et l'efficacité du processus sur de grandes surfaces (F. RAZZANO et al., 2024, p. 50). Ces avantages font de GEE un outil puissant pour compléter la surveillance in situ, souvent coûteuse et spatialement limitée.

Cette étude vise à évaluer la dynamique de la turbidité du lac de Guiers sur l'année 2024 à partir d'images Sentinel-2, en mobilisant deux algorithmes empiriques validés dans la littérature (L. LYMBURNER et al., 2016, p. 108) depuis le cloud. En l'absence de données de terrain récentes, l'approche adoptée est qualitative, avec une catégorisation des niveaux de turbidité. L'objectif est de démontrer l'intérêt opérationnel de la télédétection et du cloud computing pour le suivi environnemental des plans d'eau sahéliens, en vue d'orienter les stratégies de gestion durable de cette ressource essentielle.

1 Matériels et méthodes

1.1 Présentation de la zone d'étude : le lac de Guiers

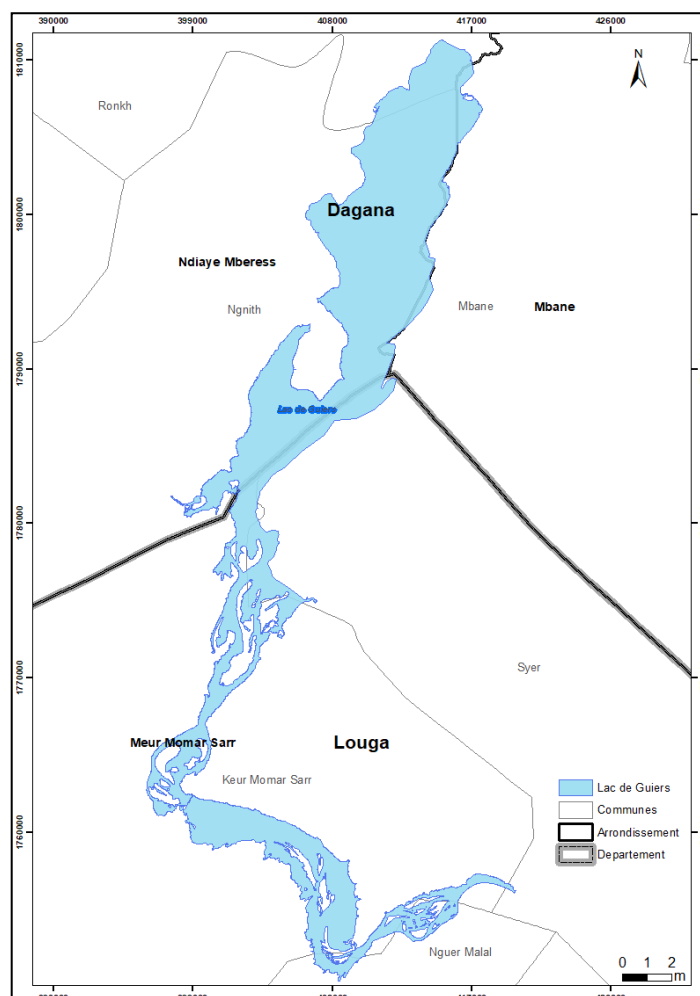
Situé entre les régions de Louga et de Saint-Louis, le lac de Guiers (Fig.1) s'étend sur environ 170 km² en période de hautes eaux (S. O. NIANG et al., 2012, p. 1). D'origine naturelle, il est principalement alimenté par le fleuve Sénégal via le canal de Taoué, ainsi que par les précipitations saisonnières. Peu profond (3 à 4 m en moyenne), ce plan d'eau est particulièrement sensible aux apports sédimentaires, dans un contexte sahélien marqué par une saison des pluies (juin-octobre) et une saison sèche (novembre-mai).

Le lac joue un rôle stratégique dans l'approvisionnement en eau potable, notamment pour la ville de Dakar à travers la Société Nationale des Eaux du Sénégal (SONES), mais aussi pour les besoins des populations riveraines et les activités agro-pastorales (M. B. SAGNA, 2015, p. 412). Il constitue également un réservoir écologique majeur, abritant des zones humides d'importance internationale, notamment pour l'avifaune migratrice.

Cependant, cette ressource fait face à de multiples pressions environnementales, telles que l'extension des surfaces agricoles, l'utilisation croissante d'intrants chimiques, les rejets domestiques non traités, ainsi que les effets du changement climatique, qui altèrent progressivement la qualité des eaux (J. FALL et al., 2018, p. 921). Ces dynamiques soulèvent des enjeux cruciaux en matière de gestion intégrée des ressources en eau.

Dans ce contexte, une évaluation rigoureuse de la qualité de l'eau du lac de Guiers s'avère indispensable pour orienter les décisions publiques, préserver les fonctions écosystémiques du lac et assurer la pérennité des services socio-économiques qu'il fournit.

Figure 1: Présentation de la zone d'étude



Source : L. TOURE, 2025

1.2 Données utilisées

Cette étude évalue la qualité des eaux du lac de Guiers en s'appuyant sur deux principales sources de données : des images optiques issues du satellite Sentinel-2 et des produits dérivés du Global Surface Water (GSW) à 10 mètres de résolution, issues du catalogue de données de Google earth engine. Ces derniers permettent de cibler spécifiquement les zones aquatiques, optimisant ainsi les calculs.

1.2.1 Imagerie Sentinel-2

Le satellite Sentinel-2, développé dans le cadre du programme Copernicus de l'Union européenne, fournit des images multispectrales à haute résolution spatiale (10 à 20 m) et à fréquence de revisite élevée.

Ces caractéristiques en font un instrument privilégié pour le suivi environnemental et l'analyse des eaux continentales (M. DRUSCH et al. , 2012, p. 25).

Les images exploitées sont des produits de niveau 2A, préalablement corrigés des effets atmosphériques pour fournir une réflectance de surface fiable, essentielle à une analyse spectrale précise (M. MAINKNORN et al., 2017, p. 3). Pour cette recherche, les bandes spectrales retenues sont consignées dans le tableau 1.

Tableau 1: Bandes spectrales de Sentinel-2 utilisées

Bande	Nom	Longueur onde (nm)	Résolution	Rôle
B2	Bleu	490	10 m	Sensible aux matières en suspension fines
B3	Vert	560	10 m	Bonne corrélation avec la turbidité
B4	Rouge	665	10 m	Détection des matières organiques

Source : ESA, 2015

Afin de réduire les variations dues aux conditions atmosphériques, aux fluctuations de niveau ou aux perturbations saisonnières (nuages, ombres), une méthode de composition temporelle a été appliquée. Ainsi, pour chaque mois de l'année 2024, une image géomédiane a été générée à partir des données Sentinel-2 disponibles.

La géomédiane, atténue l'impact des valeurs extrêmes tout en préservant la cohérence spectrale. Elle offre ainsi une vision mensuelle représentative de l'état moyen du lac, facilitant l'application d'algorithmes empiriques pour estimer des paramètres tels que la matière totale en suspension (TSM).

1.2.2 Données Global Surface Water

Le jeu de données Global Surface Water (GSW) à 10 m, développé par le Joint Research Centre (JRC) de la Commission européenne, représente une innovation majeure en télédétection des surfaces aquatiques (J.-F. PEKEL et al., 2016, p. 418). Cette base de données, fondée sur les images Sentinel-2, se révèle particulièrement pertinente pour les études hydrologiques. Elle se distingue par une résolution spatiale élevée de 10 mètres, nettement supérieure à celle des produits comparables (30 m), ce qui permet une détection plus précise et détaillée des plans d'eau. Elle offre également une fréquence temporelle importante, avec des mises à jour mensuelles, permettant un suivi dynamique et régulier de l'évolution des surfaces en eau. Enfin, sa couverture globale et systématique garantit une homogénéité spatiale et temporelle des données à l'échelle mondiale (G. DONCHYTS et al., 2016, p. 810).

L'algorithme de classification s'appuie sur les bandes spectrales du visible et de l'infrarouge, optimisé pour détecter les variations subtiles des étendues d'eau (L. DE KEUKELAERE et al., 2018, p. 525). Dans le cadre de notre recherche, ce produit à haute résolution permet une délimitation plus précise des contours du lac, y compris dans les zones littorales complexes et les petits affluents, souvent mal représentés par les données à plus faible résolution (R. ZHAO et al., 2022, p. 192). Il offre également une meilleure caractérisation des dynamiques hydrologiques, facilitant l'analyse conjointe des pressions anthropiques, telles que les prélèvements d'eau, et des processus naturels comme l'évaporation ou la sédimentation.

1.3 Méthodologie

La qualité des eaux du lac a été analysée à l'aide de deux algorithmes empiriques, spécialement adaptés aux milieux aquatiques continentaux depuis Google earth engine. Ces modèles exploitent des corrélations statistiques établies entre les réflectances spectrales mesurées par satellite et des données de terrain concernant la turbidité.

La méthodologie adoptée comprend trois étapes clés :

- Prétraitement des images satellitaires pour assurer leur qualité et leur cohérence
- Extraction précise des surfaces en eau à l'aide de masques de détection
- Calcul des concentrations en matières en suspension à partir des relations algorithmiques

Cette approche permet une quantification fiable des paramètres de qualité des eaux tout en tenant compte des spécificités du milieu étudié.

1.3.1 Prétraitement des données Sentinel-2

Les images utilisées sont des produits de niveau 2A (réflectance de surface corrigée atmosphériquement), optimisées pour l'analyse quantitative. Les étapes de prétraitement comprennent le filtrage des nuages et perturbations atmosphériques, l'utilisation de la bande de classification de scène (SCL) pour identifier et masquer automatiquement les pixels nuageux ou ombragés, garantissant des données exploitables, l'extraction des bandes spectrales clés.

La sélection des bandes spectrales essentielles pour les algorithmes d'estimation de la qualité de l'eau repose sur leur sensibilité à différents paramètres optiques. La bande B2 (bleu, 490 nm) permet de détecter efficacement les matières en suspension fines, fréquemment issues de l'érosion ou du ruissellement. La bande B3 (vert, 560 nm) est particulièrement adaptée à l'estimation de la turbidité, car elle capte la diffusion de la lumière provoquée par les particules en suspension dans l'eau. Enfin, la bande B4 (rouge, 665 nm) permet l'identification des

matières organiques dissoutes, notamment les pigments ou substances humiques, qui présentent une absorption marquée dans cette longueur d'onde.

1.3.2 Génération et Application du Masque d'Eau avec Global Surface Water

Afin d'éviter les biais liés à la présence de pixels non aquatiques, un masque binaire eau/non-eau a été appliqué. Ce masque est issu du produit Global Surface Water, qui repose sur l'analyse de séries temporelles d'images satellitaires et offre une détection fiable des surfaces en eau libre.

La méthode de masquage des surfaces en eau repose sur une approche rigoureuse en trois étapes. Premièrement, les pixels classifiés comme eau sont sélectionnés systématiquement. Deuxièmement, les pixels incertains sont éliminés, notamment ceux correspondant à la végétation aquatique, aux sédiments très turbides ou aux zones de bordure entre terre et eau. Enfin, le masque résultant est appliqué aux images Sentinel-2 afin de ne conserver que les zones aquatiques valides pour les analyses ultérieures.

Cette méthode présente plusieurs avantages déterminants. Elle permet d'éliminer efficacement les artefacts courants en télédétection aquatique tels que les effets de turbidité extrême, les ombres portées ou la végétation émergente. Plus fondamentalement, elle améliore significativement la précision des réflectances utilisées dans les algorithmes de qualité des eaux, comme l'ont démontré Mueller et ses collaborateurs dans leurs travaux de référence (R. D. MÜLLER et al., 2016, p. 107). Cette approche de masquage constitue donc une étape cruciale pour garantir la fiabilité des résultats dans les études de qualité des eaux par télédétection.

1.3.3 Algorithmes empiriques appliqués

Les modèles suivants ont été utilisés pour évaluer la qualité des eaux :

1.3.3.1 Méthodologie d'estimation de la matière totale en suspension (TSM) par l'algorithme de Lyburner et al. (2016),

L'évaluation des concentrations de TSM dans le lac de Guiers a été réalisée en appliquant l'algorithme empirique développé par L. LYMBURNER et al. (2016, p. 108), initialement conçu pour les eaux peu profondes et turbides des systèmes aquatiques australiens. Ce choix méthodologique se justifie par les similarités écologiques entre ces environnements et les caractéristiques du lac de Guiers, notamment en termes de profondeur et de dynamique sédimentaire (N. PAHLEVAN et al., 2020, p. 111).

Le modèle repose sur une relation puissance entre la réflectance combinée des bandes vertes (B3) et rouges (B4) de Sentinel-2 (Eq.1) :

$$TSM = 3957 * \left(\frac{(B3 + B4) * 0.0001}{2} \right)^{1.6436} \quad (\text{Eq. 1})$$

où B3 et B4 représentent les valeurs de réflectance de surface dans les bandes spectrales correspondantes. Le facteur 0.0001 permet la conversion des valeurs numériques en réflectance physique (N. PAHLEVAN et al., 2017, p. 6015).

Compte tenu de l'absence de données in situ permettant une recalibration locale des estimations satellitaires, les résultats ont été interprétés avec prudence. À cette fin, les concentrations en matières en suspension totales (TSM) ont été classées selon une typologie qualitative en trois catégories : une faible turbidité correspond à des valeurs de TSM inférieures à 300 mg/L, traduisant des eaux relativement claires ; une turbidité moyenne est définie pour des concentrations comprises entre 300 et 1000 mg/L, reflétant des eaux modérément chargées ; enfin, une forte turbidité est associée à des valeurs de TSM supérieures ou égales à 1000 mg/L, généralement indicatrices d'eaux très turbides, souvent en lien avec des apports sédimentaires importants.

Cette approche catégorielle permet de limiter les incertitudes liées à la transposition géographique du modèle, tout en fournissant une information exploitable pour le suivi environnemental (C. OGASAWARA et al., 2021, p. 319).

1.3.3.2 Méthodologie d'estimation du Modèle linéaire de Quang et al. (2017) pour l'estimation de la concentration en matière en suspension totale.

Le second algorithme appliqué, développé par N. QUANG et al. (2017, p. 570), repose sur une relation linéaire empirique entre la réflectance dans la bande rouge (B4) de Sentinel-2 et la concentration en matières en suspension totales (TSS, en mg/L). La bande rouge, particulièrement sensible à la diffusion par les particules minérales en suspension, s'avère bien adaptée à la caractérisation des eaux tropicales peu profondes, où ces particules sont généralement abondantes.

Ce modèle a été spécifiquement calibré pour les eaux tropicales peu profondes, où la turbidité est modérée et où l'influence des particules minérales est bien représentée par la variation de la réflectance dans le rouge. L'équation de conversion de la réflectance en concentration de TSS est la suivante (Eq.2) :

$$\text{TSS} = 380.32 * \text{B4} * 0.0001 - 1.7826 \quad (\text{Eq. 2})$$

Ce modèle présente l'avantage d'être spécifiquement calibré pour des conditions tropicales, dans lesquelles la composition des sédiments diffère sensiblement de celle observée dans les régions tempérées (A. ESTEVA et al., 2017, p. 115). Les résultats obtenus ont été interprétés de manière qualitative, selon les seuils suivants : les eaux claires correspondent à des concentrations en TSS inférieures à 50 mg/L ; une turbidité modérée est observée pour des valeurs comprises entre 50 et 100 mg/L ; enfin, une turbidité élevée est définie pour des TSS

supérieures ou égales à 100 mg/L, bien que la précision absolue de cette estimation doive être considérée avec prudence.

1.3.4 Méthodologie d'analyse spatiale

L'analyse spatiale a été réalisée par génération de cartes mensuelles de concentrations en TSM et TSS à partir des algorithmes de L. LYMBURNER et al. (2016, p. 108) et N. QUANG et al. (2017, p. 570). Cette approche a permis d'identifier les zones critiques comme les confluences et les apports fluviaux principaux, caractérisés par des turbidités élevées.

Les transects radiaux systématiques ont été construits à l'aide du logiciel QGIS, en suivant une méthodologie standardisée. Un total de 24 radiales a été tracé depuis le centre du lac en direction des rives, avec un angle régulier de 15° entre chaque axe, assurant ainsi une couverture homogène de l'ensemble du plan d'eau. Chaque transect, d'une longueur moyenne de 8 km, a été échantillonné tous les 100 mètres afin de permettre une analyse fine des gradients spatiaux. Les valeurs de turbidité ont ensuite été extraites automatiquement grâce à l'outil Profile Tool, en exploitant les rasters mensuels de concentration.

Cette méthode a révélé des patrons spatiaux caractéristiques liés à la circulation hydrologique et aux processus d'accumulation sédimentaire. La résolution spatiale de 10m des données Sentinel-2 a offert une précision suffisante pour différencier les zones littorales (où les gradients sont plus marqués) des masses d'eau centrales (présentant une plus grande homogénéité). La combinaison de cette approche radiale avec l'analyse des cartes de concentration a permis une caractérisation tridimensionnelle des dynamiques sédimentaires dans le lac.

1.3.5 Méthodologie d'analyse temporelle

L'analyse temporelle s'est appuyée sur une série chronologique mensuelle couvrant une année hydrologique complète. Les variations saisonnières ont été quantifiées par l'évolution des indicateurs de turbidité, montrant une augmentation marquée pendant la saison des pluies (juillet à octobre). Des algorithmes de détection d'anomalies ont permis d'identifier les événements extrêmes tels que les crues soudaines ou les épisodes de vent fort générant une resuspension des sédiments. Des indices de persistance ont été calculés pour distinguer les zones de turbidité chronique des phénomènes transitoires.

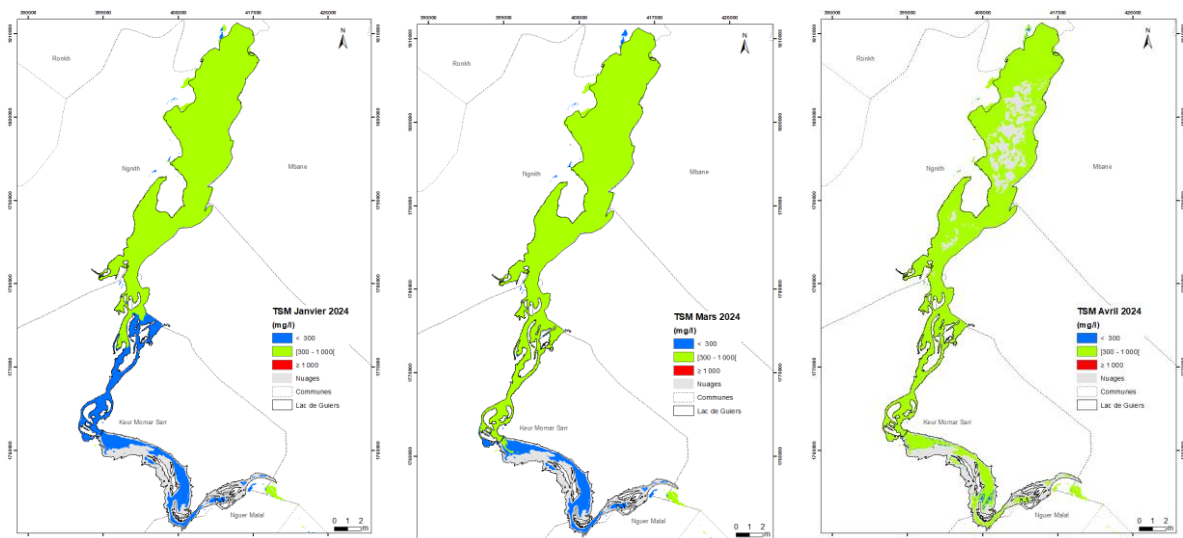
2 Résultats

2.1 Turbidité des eaux du Lac de Guiers avec en 2024

2.1.1 Indice TSM

L'analyse des cartes mensuelles de TSM (Matières en Suspension Totales) révèle une évolution saisonnière marquée (Figures 2 et 3). De janvier à mai, les faibles valeurs de TSM (généralement <100 mg/L) caractérisent des eaux claires, typiques de la saison sèche. Cette période se caractérise par un ruissellement minimal et une stabilité hydrologique, limitant l'apport de sédiments (M. BOUVY et al., 2006, p. 147). D'avril à juin, on observe une augmentation progressive de la turbidité (100-300 mg/L), probablement liée aux précipitations précoces mobilisant les sols, à l'intensification des vents alizés favorisant la resuspension et aux activités agricoles périphériques (G. DUMAS et al., 2010, p. 12).

Figure 2: Cartes TSM 2024 du Lac de Guiers de janvier au mois d'Avril

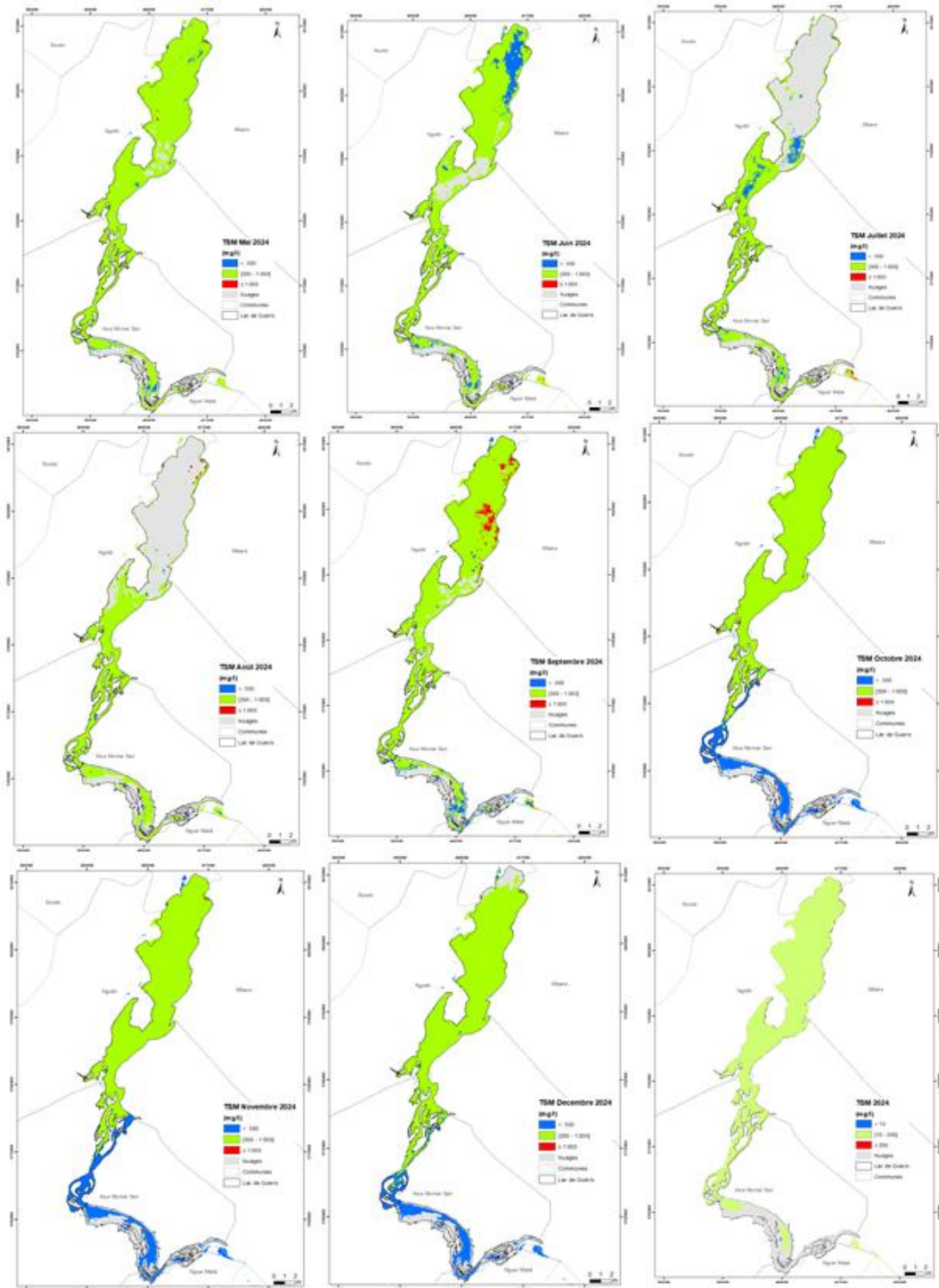


Source : L. TOURE, 2025

Après les fortes pluies, les cartes montrent que la turbidité commence à baisser. Les valeurs de l'indice TSM diminuent peu à peu. Cela veut dire que l'eau du lac devient plus claire avec le temps. Les apports en sédiments sont moins importants car les pluies diminuent, et les particules en suspension commencent à se déposer au fond du lac. Mais dans certaines zones proches des berges ou là où il y a beaucoup d'activité, l'eau reste encore un peu trouble. Cela peut être dû aux vents.

La carte annuelle (médiane) montre une turbidité dominante modérée (300-500 mg/L), avec des valeurs plus élevées (>800 mg/L) persistant près des embouchures fluviales, dans les zones de faible profondeur ainsi qu'aux sites exposés aux vents dominants.

Figure 3 : Cartes TSM 2024 du Lac de Guiers de Mai à Décembre et le composite annuel



Source : L. TOURE, 2025

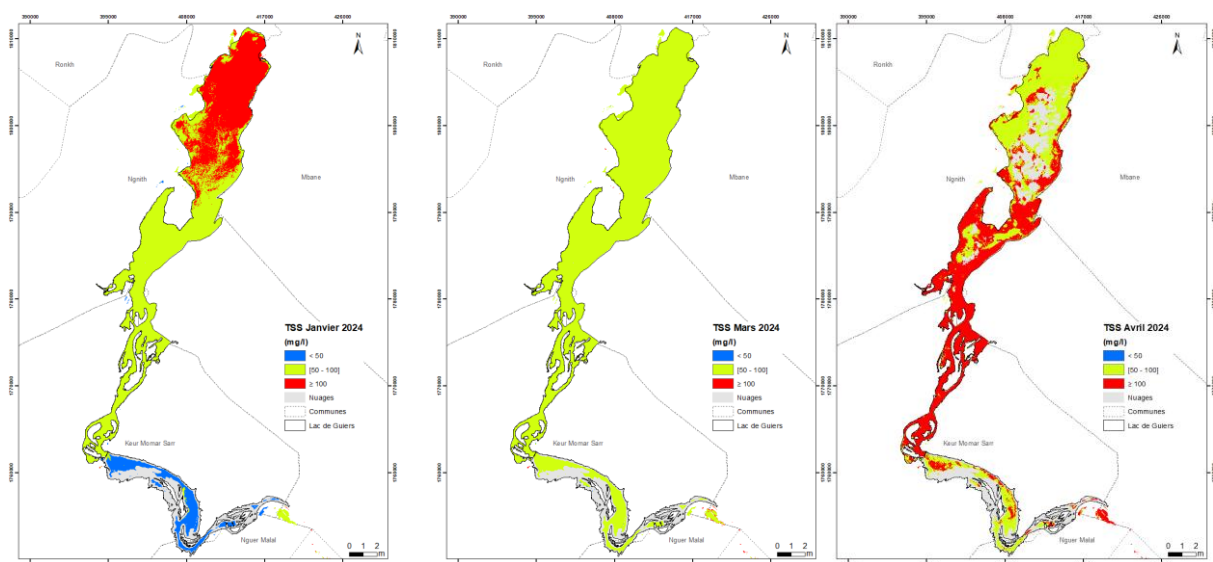
2.1.2 Indice TSS

L'analyse des solides en suspension totaux (TSS) met en évidence une dynamique saisonnière globalement similaire à celle de la matière totale en suspension (TSM), tout en présentant des différences notables (Figures 4 et 5). Durant la période sèche, de janvier à mai, les

concentrations de TSS restent généralement faibles, inférieures à 50 mg/L, ce qui confirme la clarté relative des eaux à cette période. Les valeurs observées sont légèrement inférieures à celles des TSM, avec un rapport TSS/TSM moyen d'environ 0,7, traduisant une fraction particulaire plus fine ou moins dense. Lors de la transition saisonnière, une augmentation des concentrations de TSS est observée de manière plus précoce, dès le mois de mars, traduisant une sensibilité accrue de cette variable aux premiers apports hydriques et sédimentaires. Cette sensibilité plus marquée aux précipitations ponctuelles a déjà été soulignée dans les travaux de A. I. DOGLIOTTI et al. (2015, p. 157). Enfin, au cours de la phase de décroissance, d'octobre à décembre, les concentrations de TSS diminuent plus rapidement que celles de TSM, ce qui pourrait s'expliquer par une décantation accélérée liée à la floculation des particules fines, combinée à leur moindre résistance aux courants de densité. Cette dynamique suggère que les TSS sont particulièrement sensibles aux variations hydrologiques de court terme et que leur comportement est influencé par des processus physico-chimiques plus complexes que celui des TSM.

La carte médiane annuelle montre un niveau de base modéré (80-120 mg/L) et de contrastes spatiaux prononcés caractérisés par un stabilité des zones centrales, une variabilité littorale (>200%) et des gradients plus marqués près des apports.

Figure 4: Cartes TSS 2024 du Lac de Guiers de janvier au mois d'Avril

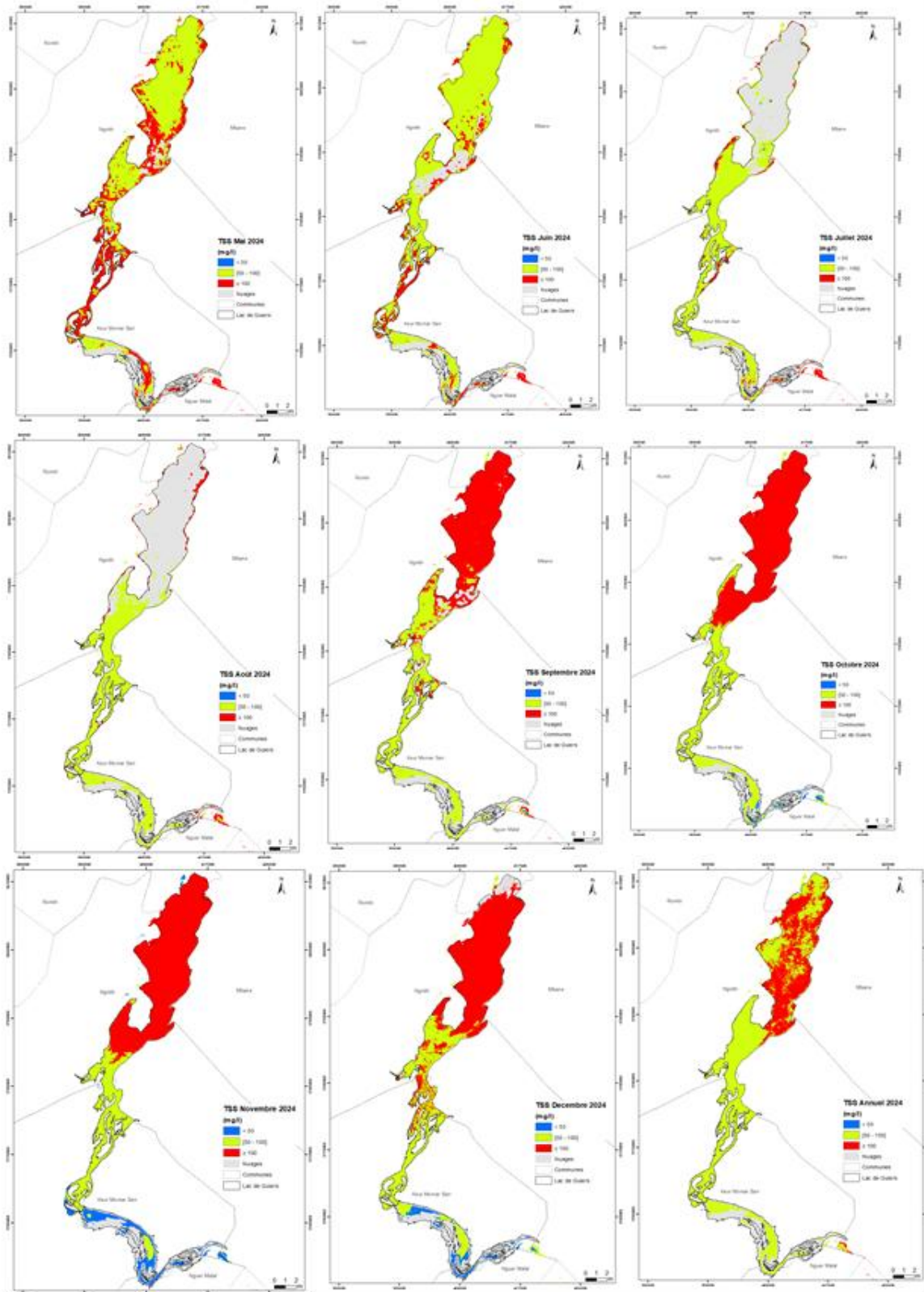


Source : L. TOURE, 2025

La décroissance plus rapide des TSS en fin de saison humide peut s'expliquer par la nature des particules (fraction majoritairement argileuse (<2 µm), tendance à la floculation en eau calme) ou à l'origine des apports (proportion plus importante de particules organiques, biodégradation accélérée en période chaude et moindre persistance dans la colonne d'eau).

Ces différences comportementales soulignent l'intérêt d'une analyse conjointe des deux indices pour une compréhension complète des processus sédimentaires.

Figure 5: Cartes TSS 2024 du Lac de Guiers de Mai à Décembre et le composite annuel



Source : L. TOURE, 2025

2.1.3 Analyse comparative

Les deux indices convergent sur la saisonnalité des apports sédimentaires, l'hétérogénéité spatiale persistante et l'influence combinée des facteurs naturels et anthropiques

Cependant, les divergences observées (amplitude des variations, sensibilité aux faibles concentrations) soulignent la complémentarité des approches, la nécessité d'une interprétation contextualisée et l'importance des calibrations spécifiques (A. BUCUR et al., 2018, p. 275).

2.2 Statistique de la qualité de l'eau TSM et TSS du lac de Guiers en 2024

L'analyse du tableau 2 et des graphiques de la figure 6 met en évidence une variation saisonnière marquée des deux indices empiriques, TSM et TSS. De janvier à mars, les valeurs demeurent relativement faibles, traduisant une eau claire et une faible turbidité. À partir du mois d'avril, une augmentation progressive de la turbidité est observée, probablement en lien avec les premières pluies qui favorisent le ruissellement et l'apport de particules. Entre juin et août, les niveaux de turbidité deviennent particulièrement élevés, coïncidant avec le cœur de la saison des pluies. Le pic maximal est atteint en septembre, période caractérisée par des précipitations intenses et un ruissellement important, entraînant des apports massifs de sédiments. À partir d'octobre, les indices diminuent progressivement, indiquant un retour à des conditions hydrologiques plus stables et une amélioration de la clarté de l'eau.

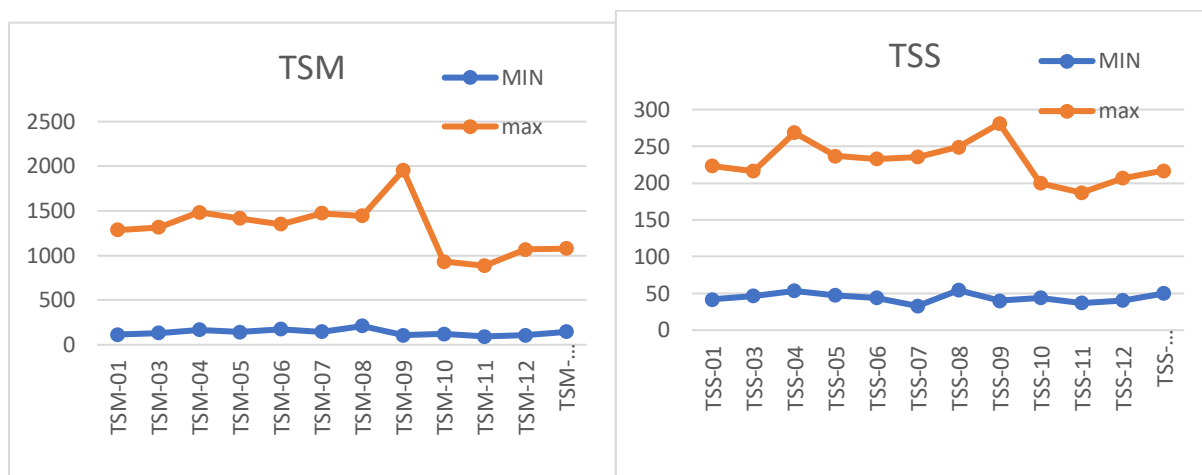
Cette évolution confirme que la qualité de l'eau du lac de Guiers est étroitement liée aux variations climatiques saisonnières, avec une turbidité maximale pendant la période pluvieuse (notamment en septembre pour le TSM) et une atténuation en saison sèche.

Tableau 2: Valeurs min et max des indices empiriques mensuels TSM et TSS

Paramètre TSM	MIN	Max	Paramètre TSS	Min	Max
Janvier	114,051	1171,33	Janvier	41,707	181,684
Mars	131,442	1183,19	Mars	46,499	170,866
Avril	168,291	1316,81	Avril	53,4779	215,304
Mai	143,835	1270,63	Mai	47,4879	189,29
Juin	174,345	1178,36	Juin	44,046	188,91
Juillet	146,509	1327,82	Juillet	37,8646	202,83
Aout	209,359	1234,16	Aout	54,2385	194,767
Septembre	106,644	1849,73	Septembre	39,9765	241,014
Octobre	120,17	810,728	Octobre	44,1601	155,746
Novembre	93,625	791,38	Novembre	37,0481	149,965
Décembre	105,619	963,219	Décembre	40,585	166,319
TSM-Annual	147,136	929,829	TSS-Annual	50,2832	166,547

Source : L. TOURE, 2025

Figure 6: Évolution temporelle des valeurs min et max des indices empiriques mensuels TSM et TSS en 2024



Source : L. TOURE, 2025

Les valeurs d'indice observées dans la zone du lac de Guiers, au Sénégal, révèlent une forte variabilité de la turbidité des eaux. Les concentrations minimales enregistrées s'étendent de 93,625 mg/L (novembre) à 209,36 mg/L (août) pour l'indice TSM (matières en suspension totales), et de 34,048 mg/L (novembre) à 54,24 mg/L (août) pour l'indice TSS (solides en suspension totaux). Ces données indiquent une activité hydrologique constante.

À l'inverse, les concentrations maximales atteignent 1 849,73 mg/L pour le TSM et 241,014 mg/L pour le TSS, toutes deux enregistrées en septembre, période de pluies. Cette amplitude importante reflète des événements hydrologiques intenses, tels que les précipitations abondantes, qui favorisent la remise en suspension des sédiments et augmentent la turbidité.

Les valeurs médianes annuelles varient entre 147,14 mg/L à 929,83 mg/L pour le TSM, et entre 50,28 mg/L à 166,54 mg/L pour le TSS, révélant une turbidité globalement modérée sur l'année. Ces variations traduisent une alternance entre les phases de forte turbidité et les périodes de relative clarté des eaux, influencées par les conditions de variabilité mensuelles des précipitations, les apports sédimentaires des affluents et les activités anthropiques.

Ces résultats soulignent l'importance d'un suivi régulier de la qualité de l'eau du lac de Guiers, une ressource stratégique pour l'approvisionnement en eau potable et les activités économiques locales. L'analyse des indices empiriques (TSS et TSM) constitue ainsi un outil pertinent pour évaluer les variations de turbidité et orienter les stratégies de gestion des ressources en eau dans cette région sensible du Sénégal.

Les indices TSS et TSM, indicateurs clés de la turbidité et de la concentration en sédiments en suspension, montrent des fluctuations saisonnières marquées, caractéristiques du climat sahélien.

2.3 Analyse spatio-temporelle

La carte annuelle médiane met en évidence une répartition spatiale caractéristique de la turbidité. Les zones centrales présentent des niveaux de turbidité modérés et relativement stables, avec des concentrations comprises entre 80 et 120 mg/L. En revanche, les secteurs littoraux affichent des variations plus importantes, allant de 50 à 300 mg/L, en raison de dynamiques hydrosédimentaires plus complexes. Les embouchures fluviales, quant à elles, se distinguent par des valeurs maximales de turbidité et une forte variabilité spatiale, reflétant l'intensité des apports sédimentaires issus du ruissellement continental. Cette organisation spatiale reflète l'influence combinée des apports sédimentaires différentiels, de la bathymétrie du lac et des processus de sédimentation/resuspension

Les données suggèrent par ailleurs un impact notable des activités humaines sur la dynamique sédimentaire, particulièrement visible près des zones de mise en culture intensive.

2.3.1 Évolution des Matières en Suspension (TSM)

L'analyse des concentrations de TSM révèle une dynamique saisonnière bien marquée dans les eaux du lac de Guiers. Pendant la saison sèche (janvier à mars), les faibles valeurs enregistrées (inférieures à 50 mg/L) reflètent une eau particulièrement claire. Cette situation s'explique principalement par la réduction des apports terrigènes et la stabilité des conditions hydrologiques durant cette période.

Une augmentation progressive des concentrations en matières en suspension est observée à partir du mois d'avril, avec des valeurs atteignant 100 à 150 mg/L en juin. Cette élévation de la turbidité peut être attribuée à une combinaison de facteurs environnementaux et anthropiques. D'une part, l'initiation des premières précipitations saisonnières entraîne un ruissellement accru, favorisant le transport de sédiments vers le plan d'eau. D'autre part, l'intensification des phénomènes éoliens contribue à la remise en suspension des particules fines dans les zones peu profondes. Enfin, la reprise des activités agricoles en périphérie du lac augmente la charge sédimentaire par érosion des sols et les écoulements diffus.

La période de juillet à septembre présente les concentrations maximales, dépassant fréquemment 300 mg/L dans les zones d'apports fluviaux. Ces pics de turbidité coïncident avec la saison des pluies et le maximum de débit des tributaires.

2.3.2 Évolution des Matières en Suspension Totales (TSS)

L'évolution des TSS présente des tendances globalement similaires à celles observées pour la turbidité, tout en affichant des caractéristiques propres. Les mesures indiquent des concentrations minimales, comprises entre 20 et 40 mg/L, pendant la saison sèche, traduisant

une faible présence de particules en suspension. Toutefois, les TSS montrent une sensibilité accrue aux premiers épisodes pluvieux, avec une augmentation rapide dès les premières pluies. Par ailleurs, l'analyse spatiale met en évidence des gradients plus marqués à proximité des zones de confluence, suggérant une influence significative des apports fluviaux localisés sur la dynamique des matières en suspension.

La comparaison des deux indicateurs met en évidence une bonne cohérence sur l'identification des périodes critiques, des différences dans l'amplitude des variations enregistrées et une sensibilité distincte aux différents types de particules

3 Discussion

3.1 Principaux résultats et dynamique saisonnière

L'analyse conjointe des Matières en Suspension Totales (TSM) et des Solides en Suspension Totaux (TSS) dans le lac de Guiers met en évidence trois tendances majeures. Tout d'abord, une forte variabilité saisonnière se dégage : la turbidité atteint son maximum durant la saison humide (juin à octobre), avec un pic de 1 849 mg/L de TSM enregistré en septembre. Cette élévation résulte principalement de l'érosion des sols et des apports sédimentaires véhiculés par les canaux de drainage, un phénomène comparable à celui observé dans des systèmes fortement impactés comme le lac Tchad (BOUVET et al., 2019, p. 102). En saison sèche (novembre à mai), la turbidité tend à diminuer, mais des concentrations résiduelles de TSS persistent, notamment dans les zones peu profondes ou soumises à une pression anthropique intense (irrigation, bétail). Ce schéma est également documenté dans le lac Victoria (J. AWANGE, 2021, p. 245).

Ensuite, les TSM et TSS réagissent de manière différenciée aux dynamiques hydrosédimentaires. Les TSM traduisent des apports ponctuels liés à des événements hydrologiques intenses, comme les crues, avec des pics localisés à proximité des embouchures. À l'inverse, les TSS signalent une turbidité chronique d'origine anthropique, en lien avec l'agriculture et l'élevage, qui se maintient tout au long de l'année, notamment dans les zones d'intensification agricole (X. ZHANG et al., 2019).

Enfin, les affluents jouent un rôle déterminant dans la dynamique sédimentaire du lac. Plus de 80 % des apports solides proviennent de trois canaux principaux, où les pratiques agricoles peu durables aggravent l'érosion des sols. Cette configuration est similaire à celle observée dans d'autres plans d'eau situés en zone semi-aride (D. DOXARAN et al., 2002, p. 149).

3.2 Complémentarité des indices TSM et TSS

L'utilisation conjointe des indicateurs TSM et TSS offre un levier d'analyse pertinent pour différencier les dynamiques naturelles des influences anthropiques. Un rapport TSM/TSS élevé en saison humide est généralement révélateur d'un transport naturel de sédiments, porté par les écoulements de surface. En revanche, une concentration de TSS disproportionnée durant la saison sèche suggère une origine humaine, souvent liée à la remise en suspension des particules fines par les activités de pêche. Toutefois, cette approche présente certaines limites. Les divergences observées entre les deux indices mettent en évidence la nécessité d'une calibration locale des modèles, particulièrement dans les zones peu profondes (moins de deux mètres), où la réflexion du fond peut fausser les mesures optiques (B. NECHAD et al., 2010, p. 854)

3.3 Implications socio-environnementales

Les variations de la turbidité ont des conséquences critiques sur plusieurs plans. En ce qui concerne l'approvisionnement en eau potable, les pics de TSM observés en septembre entraînent une augmentation d'environ 30 % des coûts de traitement (MATTHIEU et al., 2017), ce qui constitue une contrainte majeure pour les communautés riveraines. Sur le plan de l'agriculture irriguée, l'accumulation progressive de sédiments provoque l'envasement des infrastructures hydrauliques, réduisant leur efficacité de 15 à 20 % (B. DUBREUIL et al., 2019, p. 1245). Enfin, sur le plan écologique, une turbidité prolongée freine la productivité primaire des écosystèmes aquatiques (C. M. O'REILLY et al., 2015, p. 10), compromettant ainsi les ressources halieutiques dont dépendent de nombreuses populations locales.

3.4 Vers un suivi opérationnel : une approche hybride

Pour pallier le manque de données, nous proposons un cadre méthodologique intégrant trois volets complémentaires. D'une part, la télédétection constitue un pilier central, avec le traitement automatisé des images Sentinel-2 et Landsat sur la plateforme Google Earth Engine (GEE), selon l'approche de N. GORELICK et al. (2017, p. 18), en mobilisant des algorithmes pré-entraînés pour la cartographie des TSM et TSS (B. NECHAD et al., 2010, p.854). D'autre part, une vérification terrain ciblée est envisagée, reposant sur un échantillonnage mensuel dans les zones à risque (notamment les embouchures et périmètres irrigués), afin d'ajuster et de calibrer les modèles. Enfin, l'implication des acteurs locaux apparaît essentielle, à travers la formation des gestionnaires à l'utilisation de GEE (H. TAMIMINIA et al., 2020, p. 152) et la promotion de pratiques anti-érosives adaptées aux contextes locaux (BORRELLI et al., 2017, p.25).

3.5 *Limites et perspectives*

Certaines limites méthodologiques méritent d'être soulignées. Les incertitudes des modèles constituent un enjeu important, notamment en zones peu profondes où la réflexion du fond peut conduire à une surestimation des TSM, rendant indispensable l'application d'une correction bathymétrique (N. PAHLEVAN et al., 2020, p. 16). En termes de reproductibilité, si la méthode est transférable à d'autres lacs sahéliens, elle nécessite toutefois une adaptation des seuils de turbidité aux spécificités hydrologiques et sédimentaires locales. Enfin, une validation à long terme s'impose : le prolongement des analyses au-delà de l'année 2024 permettra de mieux identifier les tendances interannuelles, en particulier dans un contexte marqué par l'intensification des effets du changement climatique (J. LEMOALLE et al., 2012, p. 247).

Conclusion

Cet article a démontré la faisabilité de l'utilisation des données Sentinel-2 combinées à des algorithmes empiriques pour le suivi de la turbidité des eaux continentales dans un contexte sahélien. L'analyse des indices TSM et TSS permet de caractériser les dynamiques saisonnières de la qualité de l'eau du lac de Guiers, influencées à la fois par des facteurs naturels (pluviométrie, ruissellement, érosion) et anthropiques (agriculture, occupation des sols, pompage).

Les résultats montrent que TSM est particulièrement sensible aux pics de turbidité pendant la saison des pluies, traduisant les apports massifs en sédiments. TSS, quant à lui, fournit une évaluation complémentaire en se concentrant sur la fraction fine des matières en suspension, mieux corrélée aux activités humaines autour du plan d'eau.

Malgré les incertitudes liées à l'absence de données in situ pour la calibration locale des modèles, l'approche qualitative adoptée reste robuste pour identifier les tendances spatio-temporelles.

Ces résultats soulignent l'importance d'un suivi opérationnel basé sur la télédétection, qui pourrait être intégré dans des dispositifs de gestion participative et de veille environnementale. À terme, une validation croisée avec des mesures de terrain permettrait d'affiner les modèles utilisés et d'élargir leur domaine d'application à d'autres écosystèmes aquatiques de la région.

Références bibliographiques

BOUVY Marc, BA Ndague, KA Saliou, SANÉ Samba, PAGANO Marc et ARFI Robert, 2006, Phytoplankton community structure and species assemblage succession in a shallow tropical lake (Lake Guiers, Senegal), *Aquatic Microbial Ecology*, vol. 45, p. 147-161.

- BUCUR Andreea, WAGNER Wolfgang, ELEFANTE Stefano, NAEIMI Vahid et BRIESE Christian, 2018, Development of an Earth Observation Cloud Platform in Support to Water Resources Monitoring, in *Earth Observation Open Science and Innovation*, Cham, Springer International Publishing, p. 275-283.
- DOGLIOTTI Ana Inés, RUDDICK Kevin George, NECHAD Bouchra, DOXARAN David et KNAEPS Els, 2015, A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters, *Remote Sensing of Environment*, vol. 156, p. 157-168.
- DRUSCH Matthias, DEL BELLO Umberto, CARLIER Sylvain, COLIN Olivier, FERNANDEZ Victor, GASCON Ferran, HOERSCH Bianca, ISOLA Claudio, LABERINTI Paolo, MARTIMORT Philippe, MEYGRET Aimé, SPOTO François, SY Ousmane, MARCHESE Francesco et BARGELLINI Pierluigi, 2012, Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services, *Remote Sensing of Environment*, vol. 120, p. 25-36.
- DUMAS Guillaume, NADEL Jacqueline, SOUSSIGNAN Robert, MARTINERIE Jacques et GARNERO Line, 2010, Inter-brain synchronization during social interaction , *PLoS One*, vol. 5, n° 8, p. e12166.
- ESTEVA Andre, KUPREL Brett, NOVOA Roberto Antonio, KO Justin, SWETTER Susan Marie, BLAU Helen Margaret et THRUN Sebastian, 2017, Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks, *Nature*, vol. 542, n° 7639, p. 115-118.
- FALL Johanna, CIANNELLI Lorenzo, SKARET Georg et JOHANNESSEN Edda, 2018, Seasonal dynamics of spatial distributions and overlap between Northeast Arctic cod (*Gadus morhua*) and capelin (*Mallotus villosus*) in the Barents Sea, *PLOS ONE*, vol. 13, n° 10, p. e0205921.
- KOLLI Meena Kumari et CHINNASAMY Pennan, 2024, Estimating turbidity concentrations in highly dynamic rivers using Sentinel-2 imagery in Google Earth Engine : Case study of the Godavari River, India, *Environmental Science and Pollution Research International*, vol. 31, n° 23, p. 33837-33847.
- LI Xin, LYU Xin, TONG Yao, LI Shengyang et LIU Daofang, 2019, An Object-Based River Extraction Method via Optimized Transductive Support Vector Machine for Multi-Spectral Remote-Sensing Images , *IEEE Access*, vol. 7, p. 46165-46175.
- LYMBURNER Leo, BOTHA Elizabeth, HESTIR Erin, ANSTEE Janet, SAGAR Stephen, DEKKER Arnold et MALTHUS Tim, 2016, Landsat 8 : Providing continuity and increased precision for measuring multi-decadal time series of total suspended matter, *Remote Sensing of Environment*, vol. 185, p. 108-118.
- MAIN-KNORN Magdalena, PFLUG Bringfried, LOUIS Jerome, DEBAECKER Vincent, MÜLLER-WILM Uwe et GASCON Ferran, 2017, Sen2Cor for Sentinel-2, in *Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII*, Warsaw, Poland, SPIE, p. 3.
- MÜLLER R. Dietmar, SETON Maria, ZAHIROVIC Sabin, WILLIAMS Simon Edward, MATTHEWS Kara Judith, WRIGHT Nicky Maria, SHEPHARD Grace Elizabeth, MALONEY Kayla Theresa, BARNETT-MOORE Nicholas, HOSSEINPOUR Maral, BOWER Daniel James et CANNON John, 2016, Océan Basin Evolution and Global-Scale Plate Reorganization Events Since Pangea Breakup, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 44, n° 1, p. 107-138.

- NECHAD Bouchra, RUDDICK Kevin George et PARK Youngje, 2010, Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters, *Remote Sensing of Environment*, vol. 114, n° 4, p. 854-866.
- NIANG Serigne Omar, NDIAYE Maodo, LY Fatimata, DIALLO Moussa, BOUKSANI Sonia, DIOP Assane, DIATTA Boubacar Ahy, DIENG Mame Thierno et KANE Assane, 2012, The Vitiligo in Senegal, *ISRN Dermatology*, vol. 2012, p. 1-3.
- OGASAWARA Christian, PHILBRICK Brandon David et ADAMSON D. Cory, 2021, Meningioma: A Review of Epidemiology, Pathology, Diagnosis, Treatment, and Future Directions, *Biomedicines*, vol. 9, n° 3, p. 319.
- PAHLEVAN Nima, ROGER Jean-Claude et AHMAD Ziauddin, 2017, Revisiting short-wave-infrared (SWIR) bands for atmospheric correction in coastal waters, *Optics Express*, vol. 25, n° 6, p. 6015.
- PAHLEVAN Nima, SMITH Brandon, SCHALLES John, BINDING Caren, CAO Zhigang, MA Ronghua, ALIKAS Krista, KANGRO Kersti, GURLIN Daniela, HÀ Nguyễn, MATSUSHITA Bunkei, MOSES Wesley, GREB Steven, LEHMANN Moritz Klaus, ONDRUSEK Michael, OPPELT Natascha et STUMPF Richard, 2020, Seamless retrievals of chlorophyll-a from Sentinel-2 (MSI) and Sentinel-3 (OLCI) in inland and coastal waters: A machine-learning approach, *Remote Sensing of Environment*, vol. 240, p. 111604.
- PEKEL Jean-François, COTTAM Andrew, GORELICK Noel et BELWARD Alan Stewart, 2016, High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes, *Nature*, vol. 540, n° 7633, p. 418-422.
- QUANG Nguyen, SASAKI Jun, HIGA Hiroto et HUAN Nguyen, 2017, Spatiotemporal Variation of Turbidity Based on Landsat 8 OLI in Cam Ranh Bay and Thuy Trieu Lagoon, Vietnam, *Water*, vol. 9, n° 8, p. 570.
- RAZZANO Francesca, MAURO Francesco, DI STASIO Pietro, MEONI Gabriele, ESPOSITO Marco, SCHIRINZI Gilda et ULLO Silvia Liberata, 2024, Monitoring water contaminants in coastal areas through ML algorithms leveraging atmospherically corrected Sentinel-2 data, *arXiv.*, p. 50.
- SAGNA Maurice Badara, 2015, *Ethnobotany, Ecology, Phenological Monitoring and Physico-chemical and Nutritional Characterization of the Desert Date Tree (Balanites aegyptiaca (L.) Del in the Ferlo of Senegal* p. 50.
- VANHELLEMONT Quinten et RUDDICK Kevin, 2016, Acolite for Sentinel-2: Aquatic Applications of MSI Imagery, p. 55.
- ZHANG Chenlu, LIU Yongxin, CHEN Xiuwan et GAO Yu, 2022, Estimation of Suspended Sediment Concentration in the Yangtze Main Stream Based on Sentinel-2 MSI Data, *Remote Sensing*, vol. 14, n° 18, p. 4446.

Auteur

¹Enseignant Chercheur, Département Environnement, biodiversité et développement durable, Université du Sine Saloum Elhadj Ibrahima Niass (USSEIN), Sénégal, labaly.toure@ussein.edu.sn