

Évaluation spatio-temporelle de la qualité de l'eau du lac de Guiers (Sénégal) par télédétection : dynamique de la chlorophylle-a et des substances jaunes (1995-2025)

Niokhor Ndour

Ecole Doctorale Eau, Qualité et Usages de l'Eau (EDEQUE),
Département de Géographie, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal

Thierno Bachir Sy

Cheikh Ndiaye

Département de Géographie, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal

Alioune Kane

Professeur titulaire en Hydrologie Continentale, EDEQUE,
Département de Géographie, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal

[Doi:10.19044/esj.2026.v22n8p184](https://doi.org/10.19044/esj.2026.v22n8p184)

Submitted: 29 December 2025

Accepted: 28 February 2026

Published: 31 March 2026

Copyright 2026 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Ndour, N., Sy, T.B., Ndiaye, C. & Kane, A. (2026). *Évaluation spatio-temporelle de la qualité de l'eau du lac de Guiers (Sénégal) par télédétection : dynamique de la chlorophylle-a et des substances jaunes (1995-2025)*. European Scientific Journal, ESJ, 22 (8), 184.

<https://doi.org/10.19044/esj.2026.v22n8p184>

Résumé

Cette étude propose une approche intégrée combinant la télédétection spatiale et les systèmes d'information géographique (SIG) pour le suivi et l'évaluation de la qualité des eaux du lac de Guiers. La méthodologie repose sur l'exploitation d'indices multispectraux, notamment le Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), ainsi que sur l'application de modèles empiriques adaptés aux milieux aquatiques sahéliens. Ces outils ont permis d'estimer les concentrations en chlorophylle-a (Chl-a) et en substances jaunes (Substances Colored Dissolved Organic Matter, CDOM). L'analyse spatio-temporelle menée sur la période 1995–2025 révèle une dégradation progressive de la qualité de l'eau, marquée par une transition vers des états trophiques plus élevés et une vulnérabilité accrue aux apports anthropiques. Les cartes produites mettent en évidence une extension des zones à forte productivité phyto-planctonique et à haute charge organique, particulièrement dans les secteurs sud et sud-est du lac. Ces résultats soulignent la pertinence

de la télédétection pour le suivi à grande échelle des paramètres de qualité de l'eau et confirment son potentiel en tant qu'outil d'aide à la décision pour la gestion durable des ressources hydriques au Sénégal.

Mots clés : Qualité de l'eau ; Chlorophylle-a ; Substances jaunes (CDOM) ; Indices spectraux (MNDWI) ; Lac de Guiers ; Sénégal

Spatio-Temporal Assessment of Water Quality in Lake Guiers (Senegal) Using Remote Sensing: Dynamics of Chlorophyll-A and Substances Colored Dissolved Organic Matter (CDOM) (1995-2025)

Niokhor Ndour

Ecole Doctorale Eau, Qualité et Usages de l'Eau (EDEQUE),
Département de Géographie, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal

Thierno Bachir Sy

Cheikh Ndiaye

Département de Géographie, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal

Alioune Kane

Professeur titulaire en Hydrologie Continentale, EDEQUE,
Département de Géographie, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal

Abstract

This study presents an integrated approach combining satellite remote sensing and Geographic Information Systems (GIS) to monitor and assess the water quality of Lake Guiers. The methodology relies on the use of multispectral indices, particularly the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), and on empirical models specifically calibrated for inland water ecosystems. These tools enabled the estimation of chlorophyll-a (Chl-a) and colored dissolved organic matter (CDOM) concentrations. A spatio-temporal analysis covering the period 1995–2025 reveals a progressive degradation of water quality, characterized by a transition from oligotrophic to eutrophic conditions and an increasing vulnerability to anthropogenic inputs. The results highlight a significant expansion of areas with high phytoplankton productivity and elevated organic matter content, mainly in the southern and southeastern parts of the lake. These findings emphasize the potential of remote sensing, coupled with empirical modeling, as an effective and cost-efficient tool for large-scale water quality monitoring and for supporting sustainable water resource management in semi-arid environments.

Keywords: Water quality; Chlorophyll-a; Colored dissolved organic matter (CDOM); Spectral indices (MNDWI); GIS; Lake Guiers; Senegal

Introduction

La préservation des ressources en eau, qu'elles soient souterraines ou de surface, constitue aujourd'hui un enjeu majeur pour la durabilité environnementale et la sécurité sanitaire mondiale (Bkhaita & Faraj, 2025). Ces ressources subissent une dégradation croissante liée aux activités humaines, notamment l'agriculture intensive, l'industrialisation, l'urbanisation non planifiée et les rejets d'eaux usées (Lin et al., 2022). Selon l'organisation mondiale de la santé (OMS, 2025), la pollution des eaux de surface atteint désormais des niveaux préoccupants dans plusieurs régions du monde, compromettant la qualité des ressources destinées à la consommation et aux usages domestiques.

Dans les écosystèmes lacustres peu profonds, la qualité de l'eau résulte d'interactions complexes entre processus hydrologiques, biogéochimiques et biologiques, fortement influencés par les usages du bassin versant. La chlorophylle-a est couramment utilisée comme proxy de la biomasse phytoplanctonique et de l'état trophique des plans d'eau, mais son interprétation isolée peut s'avérer insuffisante dans les milieux soumis à de fortes charges organiques ou à une végétation aquatique dense. À cet égard, la matière organique dissoute colorée (CDOM) constitue un indicateur complémentaire essentiel, en raison de son rôle dans l'absorption de la lumière, la régulation de la productivité primaire et les processus de décomposition de la matière organique. L'analyse conjointe de la Chl-a et du CDOM permet ainsi une lecture plus intégrée de la dynamique écologique des eaux continentales, en particulier dans les contextes tropicaux et sahéliens où les apports terrigènes et organiques sont élevés et spatialement hétérogènes (Sherbo et al., 2023; Zhang et al., 2009).

Par ailleurs, l'analyse de la qualité de l'eau sur le long terme constitue un enjeu central pour comprendre les trajectoires écologiques des lacs soumis à des pressions anthropiques croissantes. Les séries temporelles satellitaires offrent une opportunité unique pour documenter ces dynamiques à des échelles spatio-temporelles inaccessibles aux dispositifs classiques de suivi (Ngamile et al., 2025; Batina & Krtalić, 2024; Chen et al., 2025). En Afrique de l'Ouest, cependant, les études fondées sur des séries longues restent rares, souvent limitées à des périodes courtes ou à des approches ponctuelles, ce qui freine l'identification des tendances de fond et des ruptures écologiques (Sigopi et al., 2024; Mashala et al., 2023; Bangira et al., 2023). Dans le cas du lac de Guiers, l'absence de suivi continu intégrant à la fois des indicateurs biologiques (Chl-a) et organiques (CDOM) limite encore la capacité à

anticiper les risques liés à l'eutrophisation et à la dégradation de la ressource. L'exploitation d'archives satellitaires sur plusieurs décennies apparaît dès lors comme un levier stratégique pour renforcer la connaissance scientifique, éclairer la prise de décision et soutenir une gestion adaptative des ressources hydriques dans un contexte de changement global (Sigopi et al., 2024; Ngamile et al., 2025; Arabi et al., 2020; Chen et al., 2025).

Dans ce contexte scientifique et opérationnel, le suivi régulier de la qualité des eaux lacustres apparaît comme un enjeu environnemental et socio-économique majeur, particulièrement dans les zones semi-arides où ces plans d'eau constituent des réservoirs essentiels pour l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation et la préservation de la biodiversité (Cogels, 2001). Les méthodes traditionnelles de suivi, fondées sur des prélèvements ponctuels et des analyses en laboratoire, bien que précises, demeurent limitées pour appréhender la variabilité spatio-temporelle des paramètres de qualité de l'eau à l'échelle de vastes plans d'eau (Guimarães et al., 2017).

L'essor de la télédétection a permis d'élargir considérablement les capacités de suivi et d'analyse, grâce à la possibilité d'obtenir des observations continues, répétées et spatialement exhaustives. Cette technologie permet d'estimer divers paramètres optiquement actifs tels que la chlorophylle-a (Chl-a) et la matière organique dissoute colorée (CDOM), qui constituent des indicateurs fiables de l'eutrophisation et de la pollution organique (Deng et al., 2024 ; Adjovu et al., 2023 ; Sagan et al., 2020). Les capteurs multispectraux et hyperspectraux, notamment MERIS, Sentinel-2, Landsat ou MODIS, associés à des algorithmes empiriques ou semi-analytiques, offrent des perspectives prometteuses pour le suivi de la qualité de l'eau. Par ailleurs, l'intégration de caractéristiques texturales et spatiales dérivées des images satellitaires améliore la précision des estimations de la Chl-a, en particulier pour la détection des blooms algaux et la cartographie fine des zones eutrophes (Yang et al., 2023).

Au Sénégal, le Lac de Guiers représente la principale ressource en eau douce de surface du pays, assurant près de 60 % de l'approvisionnement en eau potable de la région de Dakar et soutenant d'importantes activités agricoles et halieutiques (Cogels, 2001). Cependant, la combinaison des aménagements hydrauliques, de l'irrigation intensive et des apports de polluants agricoles favorise la salinisation, l'eutrophisation et la prolifération des macrophytes, compromettant la durabilité écologique du lac. Les travaux pionniers de Diop et al. (2008) ont démontré la faisabilité d'une approche par télédétection pour évaluer la qualité de l'eau du lac à partir de données MERIS. Cependant, cette étude préliminaire souffre de plusieurs limites méthodologiques : analyse fondée sur une image unique, résolution spatiale moyenne et absence d'analyse des dynamiques saisonnières et anthropiques. Ces insuffisances montrent la nécessité de développer une approche intégrée

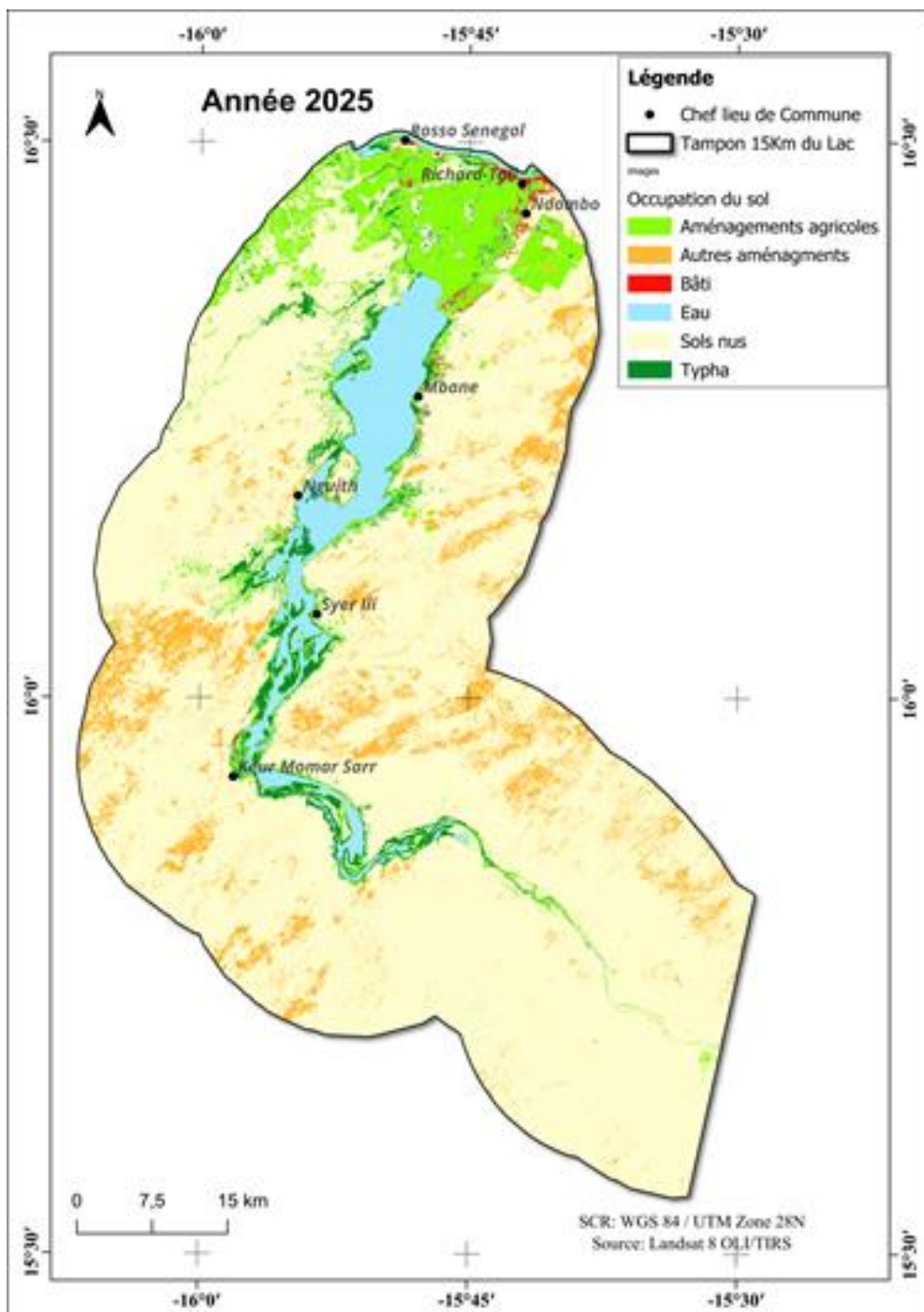
combinant données multi-temporelles à haute résolution et modèles empiriques adaptés au contexte sahélien, afin de mieux caractériser l'évolution spatio-temporelle des paramètres de qualité de l'eau du lac de Guiers et d'appuyer la gestion durable de cette ressource stratégique pour le Sénégal. Cette étude vise à quantifier les variations spatio-temporelles de la chlorophylle-a et des substances jaunes (CDOM), à identifier les zones critiques associées aux pressions anthropiques et aux dynamiques hydrologiques, et à évaluer le potentiel de la télédétection comme outil d'aide à la décision pour la gestion intégrée des ressources en eau au Sénégal.

II. Matériels et méthode

II.1. Présentation de la zone d'étude

Le lac s'étend entre 15°30' et 16°30' de latitude Nord et 15°30' et 16°00' de longitude Ouest. Il présente une profondeur moyenne d'environ 2 mètres, il couvre une superficie d'environ 320 km², mesurant près de 50 km du nord au sud et 7 km de large à son point le plus étendu (Diop et al., 2008). Le climat de la région est de type sahélo-soudanien, caractérisé par une forte variabilité saisonnière. Les précipitations annuelles varient entre 350 et 500 mm, concentrées entre juin et septembre, tandis que les températures moyennes oscillent autour de 26,3 °C. Les vents dominants, les alizés sahariens (harmattan), soufflent du nord-est et favorisent la remise en suspension des particules fines, influençant la turbidité des eaux (Ndour et al., 2024).

L'environnement du lac est marqué par une intensification rapide des aménagements agricoles, en particulier dans les communes de Richard-Toll, Ndombo, Mbane et Keur Momar Sarr (Carte 1). L'analyse de l'occupation du sol pour l'année 2025, dérivée d'une image Landsat 8 OLI/TIRS, montre une forte extension des zones cultivées et des surfaces envahies par le typha (*Typha australis*), notamment dans les zones littorales et les canaux de dérivation. Les zones bâties et les sols nus dominent le sud du bassin, tandis que les marges nord sont structurées par des aménagements hydro-agricoles intensifs.



Carte 1 : Occupation du sol sur 15 km autour du lac de Guiers en 2025 : aménagements agricoles, bâti, sols nus, typha et eau

II.2. Acquisition des données satellites

Les données satellitaires utilisées dans cette étude ont été sélectionnées pour couvrir une période de trente ans, permettant d'analyser l'évolution spatio-temporelle de la qualité des eaux du lac de Guiers entre 1995 et 2025. Les images ont été téléchargées à partir de la plateforme Google Earth Engine (GEE), qui offre un accès direct aux collections d'images Landsat corrigées (Surface Reflectance Collection).

Les images retenues correspondent à des scènes acquises durant la saison sèche (avril-mai), période généralement exempte de couverture nuageuse et propice à la comparaison interannuelle. Le choix de ces dates permet également de réduire les biais liés à la variabilité saisonnière des apports fluviaux et des phénomènes d'eutrophisation.

Les capteurs Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ et Landsat 8 OLI/TIRS ont été utilisés pour garantir la continuité temporelle et la compatibilité spectrale des données. Les bandes spectrales du visible (bleu, vert, rouge) et du proche infrarouge (NIR) ont servi à calculer les indices multispectraux permettant d'estimer la concentration en chlorophylle-a (Chl-a) et en matières organiques dissoutes colorées (CDOM).

Tableau 1: Caractéristiques des images satellitaires Landsat utilisées pour l'analyse multi-temporelle du lac de Guiers

Année	Date exacte	Capteur	Résolution	Bandes utilisées
1995	09/05/1995	Landsat 5 TM	30m	SR B1 à SR B5
2002	11/04/2002	Landsat 7 ETM+	30m	SR B1 à SR B5
2015	09/05/2015	Landsat 8 OLI/TIRS	30m	SR B2 à SR B6
2025	09/04/2025	Landsat 8 OLI/TIRS	30m	SR B2 à SR B6

II.3. Traitement et analyse des données

Les traitements réalisés dans QGIS 3.28 ont visé à extraire, normaliser et classifier les paramètres dérivés des indices multi-spectraux afin de permettre une interprétation spatio-temporelle cohérente. Dans un premier temps, les rasters issus du calcul des indices ont été découpés selon l'emprise exacte du lac de Guiers. Les valeurs spectrales correspondant à la Chl-a et aux CDOM ont ensuite été normalisées sur une échelle de 0 à 1, afin de faciliter la comparaison interannuelle et inter-paramétrique.

Une catégorisation a ensuite été effectuée pour distinguer trois classes de concentration : Faible [0 – 0,33] ; Moyenne [0,34 – 0,66] et Forte [0,67 – 1]. Cette approche de classification relative, inspirée des systèmes de classification trophique (Carlson, 1977), permet d'identifier les gradients de qualité de l'eau et les zones potentiellement à risque d'eutrophisation ou de pollution organique. Les rasters classifiés ont été convertis en couches vectorielles afin de faciliter le calcul des superficies correspondantes à chaque classe et leur analyse statistique (Guimarães et al., 2017).

Les résultats spatiaux ont ensuite été agrégés et synthétisés dans Microsoft Excel, sous forme de tableaux statistiques et de graphiques comparatifs, illustrant l'évolution spatio-temporelle des concentrations en Chl-a et CDOM pour les quatre années d'observation (1995, 2002, 2015 et 2025). Cette approche a permis de mettre en évidence les tendances d'évolution de la qualité de l'eau, de relier les variations observées aux transformations de l'occupation du sol et aux activités humaines autour du lac.

Calcul de l'indice de l'eau (MNDWI)

Les indices multispectraux permettent de transformer les luminances captées par satellite en valeurs significatives pour l'étude environnementale. Pour cette étude, l'indice utilisé est le Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), défini par l'équation suivante :

$$MNDWI = \frac{B2 - B4}{B2 + B4}$$

Où B2 correspond à la bande verte (0,52–0,60 µm) et B4 à la bande proche infrarouge/NIR (0,76–0,90 µm) pour Landsat 5 TM et Landsat 7 ETM+ ; et respectivement aux bandes B3 (vert) et B5 (NIR) pour Landsat 8 OLI/TIRS (Tableau 1).

Application des modèles empiriques pour la chlorophylle-a et les substances jaunes

Après extraction du plan d'eau, des équations empiriques ont été appliquées pour estimer précisément les concentrations en chlorophylle-a et substances jaunes.

Le modèle final retenu, présentant le meilleur coefficient de détermination ($R^2=0,703$), est le suivant

$$Chl-a = 3,4001 \left(\frac{3B3 - 2B2}{B4} \right) 1,25 + \left(\frac{B5}{B4} \right) + 2,37$$

Le modèle retenu pour déterminer la concentration en substances jaunes est :

$$Substance\ jaune = 8,024 \left(\frac{B2}{B3} \right) + 120,36 \times B2$$

III. Résultats

L'application combinée de la télédétection et des SIG pour le suivi de la qualité de l'eau du lac de Guiers de Guiers a permis d'obtenir les résultats suivants.

III.1. Cartographie spatio-temporelle de la qualité de l'eau en 1995

La cartographie de la qualité de l'eau du lac de Guiers en 1995 révèle une prédominance des faibles concentrations en chlorophylle-a (Chl-a) et en substances jaunes (CDOM), traduisant une bonne qualité optique de l'eau au cours de cette période. Les résultats du traitement d'images Landsat 5 TM

indiquent que les zones à faible concentration couvrent 229,72 km² pour la Chl-a et 292,69 km² pour le CDOM, soit plus de 80 % de la surface lacustre (Tableau 2). Les zones à concentration moyenne représentent respectivement 83,22 km² pour la Chl-a et 15,40 km² pour le CDOM. Les surfaces à forte concentration, quant à elles, demeurent marginales : 5,69 km² pour la Chl-a et 10,53 km² pour le CDOM.

Tableau 2: Superficie et part relative des classes de concentration en Chl-a et CDOM dans le lac de Guiers en 1995

Classe de concentration	Chl-a	CDOM
Faible	229.721 km ²	292.689 km ²
Moyenne	83.219 km ²	15.401 km ²
Forte	5.686 km ²	10.535 km ²

III.2. Cartographie spatio-temporelle de la qualité de l'eau en 2002

La cartographie issue des images Landsat 7 ETM+ acquises en avril 2002 montre que la qualité de l'eau du lac de Guiers reste globalement bonne, mais avec une tendance à la diminution des surfaces à forte productivité par rapport à 1995. Les résultats indiquent une prédominance marquée des faibles concentrations, aussi bien pour la chlorophylle-a (Chl-a) que pour les substances jaunes (CDOM). Les zones à faible concentration représentent respectivement 309,49 km² pour la Chl-a et 306,55 km² pour le CDOM, soit plus de 90 % de la surface lacustre (Tableau 3). Les concentrations moyennes concernent environ 8,31 km² pour la Chl-a et 6,09 km² pour le CDOM, tandis que les zones fortement chargées ne dépassent pas 0,83 km² pour la Chl-a et 5,99 km² pour le CDOM.

Tableau 3: Répartition spatiale des classes de concentration en chlorophylle-a et CDOM dans le lac de Guiers en 2002

Classe de concentration	Chl-a	CDOM
Faible	309.491 km ²	306.55 km ²
Moyenne	8.308 km ²	6.085 km ²
Forte	0.835 km ²	5.999 km ²

III.3. Cartographie spatio-temporelle de la qualité de l'eau en 2015

L'analyse de la qualité de l'eau du lac de Guiers en 2015, à partir des données Landsat 8 OLI/TIRS, révèle des modifications notables dans la répartition des concentrations en Chl-a et en CDOM par rapport aux années précédentes. Pour la chlorophylle-a, la répartition spatiale montre un rééquilibrage entre les classes de concentration : les zones à faible teneur représentent 159,22 km², soit environ la moitié de la surface lacustre, tandis que les zones moyennes s'étendent sur 158,98 km², traduisant une augmentation significative de la productivité phytoplanctonique (Tableau 4).

Les concentrations fortes demeurent marginales (0,43 km²), localisées autour des zones de stagnation et des exutoires agricoles.

Concernant les substances jaunes, la carte de 2015 révèle la poursuite de la domination des faibles concentrations (300,73 km²), mais accompagnée d'une légère expansion des zones moyennes et fortes, avec respectivement 7,73 km² et 10,18 km². Ces évolutions suggèrent un enrichissement progressif en matière organique dissoute dans certaines parties du lac.

Tableau 4: Répartition spatiale des classes de concentration en chlorophylle-a et CDOM dans le lac de Guiers en 2015

Classe de concentration	Chl-a	CDOM
Faible	159.216 km ²	300.73 km ²
Moyenne	158.983 km ²	7.726 km ²
Forte	0.435 km ²	10.179 km ²

III.4. Cartographie spatio-temporelle de la qualité de l'eau en 2025

L'analyse multi-temporelle issue des données Landsat 8 OLI/TIRS de 2025 met en évidence une évolution exponentielle de la qualité de l'eau du lac de Guiers. Par rapport à 2015, les cartes révèlent une augmentation significative des concentrations moyennes et fortes tant pour la chlorophylle-a (Chl-a) que pour les substances jaunes (CDOM), traduisant une accentuation des processus d'eutrophisation. Les résultats montrent que les zones à faible concentration se réduisent fortement, ne représentant plus que 103,90 km² pour la Chl-a et 153,36 km² pour le CDOM (Tableau 5). En revanche, les zones moyennes atteignent 164,68 km² pour la Chl-a et 152,21 km² pour le CDOM, soit une extension de près de 40 % par rapport à 2015. Les concentrations fortes, indicatrices de proliférations algales localisées et de turbidité élevée, s'étendent désormais sur 50,06 km² pour la Chl-a et 13,06 km² pour le CDOM.

Tableau 5: Répartition spatiale des classes de concentration en chlorophylle-a et CDOM dans le lac de Guiers en 2025

Classe de concentration	Chl-a	CDOM
Faible	103.898 km ²	153.361 km ²
Moyenne	164.675 km ²	152.211 km ²
Forte	50.06 km ²	13.063 km ²

Discussion

L'analyse multi-temporelle des concentrations en Chl-a et en CDOM (Figure 1 et 2) met en évidence une dégradation progressive de la qualité des eaux du lac de Guiers entre 1995 et 2025, illustrant une transition écologique d'un état oligotrophe vers un état mésotrophe, puis eutrophe localisé à partir de 2015 (Djiby et al., 2017; Cogels et al., 2001; Zhang et al., 2018).

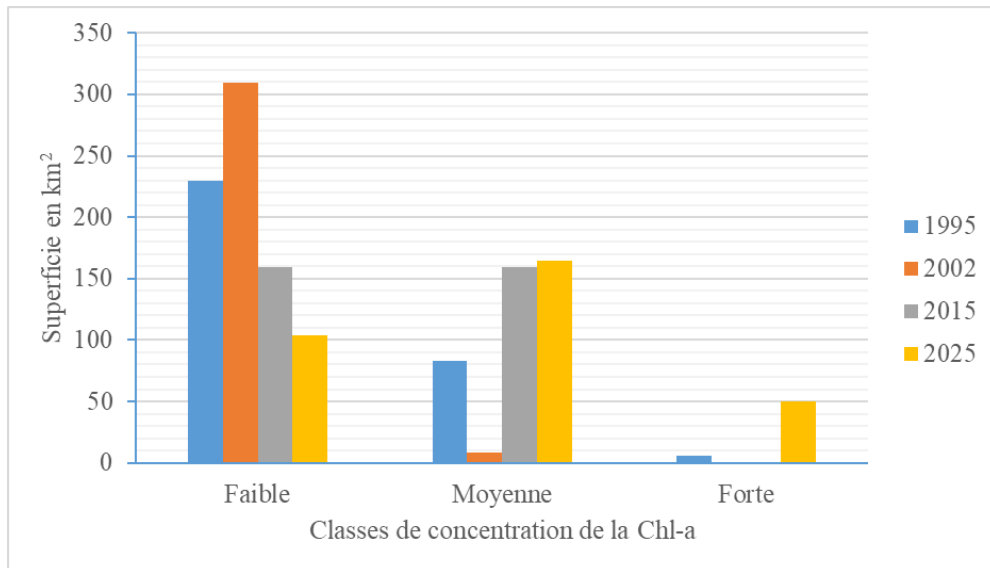


Figure 1 : Evolution spatio-temporelle des superficies (km²) des classes de concentration en Chl-a et CDOM dans le lac de Guiers entre 1995 et 2025

En 1995, le lac présentait une bonne qualité écologique, caractérisée par de faibles teneurs en Chl-a et CDOM, témoignant d'une productivité phytoplanctonique modérée et d'une forte transparence, typiques des systèmes peu perturbés (Zhang et al., 2018; Valdivia et al., 2024). Les zones à concentrations élevées, localisées le long des rives méridionales et dans certains bras latéraux, reflétaient principalement des processus naturels d'accumulation organique dans des eaux peu profondes et stagnantes (Valdivia et al., 2024). À cette époque, les pressions anthropiques étaient limitées, les aménagements agricoles restreints, et le lac conservait une forte capacité d'auto-épuration (Cogels et al., 2001; Cogels et al., 1997).

En 2002, la stabilité relative du système confirme la résilience hydrologique et écologique du lac face aux premières transformations du bassin versant (Djiby et al., 2017; Cogels et al., 2001). Cependant, la régulation hydrologique du fleuve Sénégal, consécutive à la mise en service des barrages de Diama et Manantali, a réduit la variabilité des apports en nutriments et le brassage vertical, ce qui a pu limiter la dispersion des substances organiques et favoriser leur accumulation localisée (Djiby et al., 2017; Cogels et al., 1997). L'apparition d'accumulations de CDOM dans les zones littorales sud et est suggère par un début d'enrichissement organique diffus lié à l'extension des activités agricoles (Liu et al., 2020; Zhang et al., 2018).

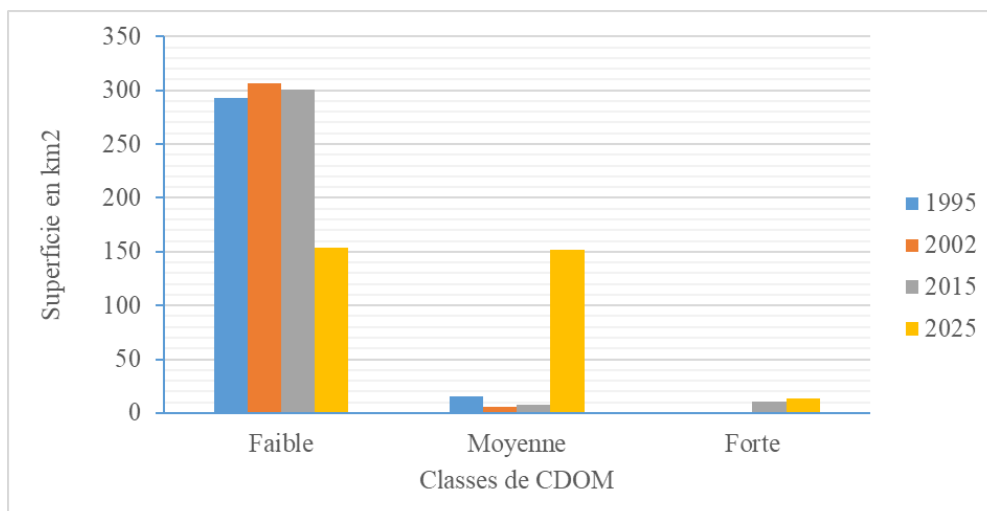


Figure 2 : Évolution des concentrations en Chl-a et CDOM par année d'observation (1995, 2002, 2015, 2025)

L'année 2015 marque une phase de transition écologique, avec une augmentation marquée des concentrations moyennes en Chl-a, traduisant une intensification de la productivité phytoplanctonique, notamment dans les zones côtières sud et sud-est, plus sensibles aux apports diffus d'engrais azotés et phosphatés (Djiby et al., 2017; Zhang et al., 2018; Naderian et al., 2025). La corrélation spatiale entre forte Chl-a et fort CDOM traduit une accumulation croissante de matière organique en décomposition, en lien avec la prolifération du *Typha australis* et d'autres macrophytes (Djiby et al., 2017; Cogels et al., 1997). Cette évolution vers un état mésotrophe avancé se manifeste par une baisse de la transparence et une réduction de la profondeur euphotique (Zhang et al., 2018; Valdivia et al., 2024).

En 2025, la situation devient préoccupante : l'extension des zones à concentration moyenne et élevée en Chl-a et CDOM reflète une intensification des apports en nutriments issus des périmètres agricoles irrigués et du ruissellement des effluents domestiques et agro-industriels (Djiby et al., 2017; Liu et al., 2020; Cogels et al., 2001; Zhang et al., 2018). Les zones les plus dégradées se concentrent au sud et au sud-est, où la turbidité et la charge organique sont les plus élevées, signalant un déséquilibre trophique croissant susceptible d'altérer la productivité primaire, la biodiversité aquatique et la qualité de l'eau potable (Djiby et al., 2017; Cogels et al., 2001; Jenny et al., 2020).

Cette évolution résulte de l'interaction de plusieurs facteurs. Il s'agit d'abord des facteurs hydrologiques : la régulation du fleuve Sénégal a modifié les cycles d'inondation et les échanges d'eau, réduisant le renouvellement et favorisant la stagnation dans certaines zones (Djiby et al., 2017; Ogilvie et al.,

2025; Cogels et al., 1997). Ensuite, les autres facteurs anthropiques dont l'expansion rapide des périmètres irrigués et l'usage intensif d'intrants chimiques ont accru les apports de nutriments et de matières en suspension (Shuvo et al., 2021; Djiby et al., 2017; Liu et al., 2020; Cogels et al., 2001). En plus, la prolifération des macrophytes accentue la décomposition organique et l'accumulation de CDOM, limitant la pénétration lumineuse et l'oxygénation (Wen et al., 2022; Misteli et al., 2022; Cogels et al., 1997). Enfin, la variabilité pluviométrique sahélienne, les épisodes de sécheresse et l'évaporation intense modifient les échanges biogéochimiques et favorisent la concentration des éléments dissous (Shuvo et al., 2021; Ogilvie et al., 2025; Chen et al., 2024).

La synergie entre eutrophisation et pollution organique se traduit par la coïncidence spatiale des zones à forte Chl-a et CDOM, une baisse progressive de la qualité optique et une altération du fonctionnement écologique du lac (Wen et al., 2022; Djiby et al., 2017; Zhang et al., 2018; Valdivia et al., 2024). Cette tendance vers un état eutrophe localisé constitue un risque pour la durabilité de la ressource, affectant la biodiversité aquatique, la production halieutique et la qualité de l'eau potable (Wen et al., 2022; Djiby et al., 2017; Jenny et al., 2020).

Face à ces enjeux, il apparaît essentiel de mettre en œuvre une gestion intégrée combinant un suivi régulier par télédétection, des campagnes de mesures in situ pour la calibration et la validation des modèles de gestion intégrée durable, ainsi que le développement de modèles biogéochimiques prédictifs afin d'anticiper les scénarios de dégradation de la ressource (Djiby et al., 2017 ; Zhang et al., 2018 ; Valdivia et al., 2024 ; Jenny et al., 2020). Par ailleurs, la restauration des zones tampons végétalisées et la régulation des apports agricoles constituent des leviers prioritaires pour limiter l'eutrophisation et préserver la qualité écologique du lac (Kritzberg et al., 2019 ; Cogels et al., 1997). Dans ce contexte, la compréhension fine des dynamiques spatio-temporelles de la chlorophylle-a et du CDOM, rendue possible par la télédétection, s'impose comme un outil scientifique et opérationnel clé pour orienter les stratégies de gestion adaptative et renforcer la résilience du lac de Guiers face aux pressions anthropiques et climatiques futures.

Conclusion

L'évaluation spatio-temporelle de la Chl-a et des CDOM par télédétection a permis de mettre en évidence une dégradation progressive de la qualité des eaux du lac de Guiers au cours des trois dernières décennies. Les résultats montrent une transition trophique marquée, passant d'un état oligotrophe à mésotrophe dans les années 1990 à un état eutrophe localisé en 2025. Cette étude confirme que la télédétection, associée à des modèles empiriques calibrés localement, constitue un outil fiable, rapide et rentable

pour le suivi à grande échelle des paramètres optiquement actifs des écosystèmes aquatiques. L'intégration d'approches avancées – notamment la fusion de données multi-capteurs et les algorithmes d'intelligence artificielle – offre de nouvelles perspectives pour une surveillance prédictive des phénomènes d'eutrophisation et une gestion proactive des ressources en eau. L'utilisation du CDOM comme indicateur sensible de l'état trophique s'avère particulièrement pertinente dans les milieux tropicaux et sahéliens, où les variations de charge organique précèdent souvent les manifestations visibles de la dégradation écologique. Enfin, la préservation durable du lac de Guiers, ressource stratégique pour l'approvisionnement en eau potable de Dakar et du nord du Sénégal ainsi que la satisfaction durable des autres usages, passe par la combinaison de plusieurs leviers complémentaires dont : un suivi satellitaire régulier pour la détection rapide des anomalies ; des campagnes de terrain pour la validation et la calibration des modèles spectraux ; et la mise en œuvre de politiques de gestion intégrée, visant à réduire les apports en nutriments, restaurer les zones tampons végétalisées et contrôler l'expansion agricole. En renforçant la synergie entre observation spatiale, recherche appliquée et gouvernance environnementale, il sera possible de garantir la résilience écologique et la durabilité hydrique du lac de Guiers face aux pressions croissantes liées au changement climatique et aux activités humaines.

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

Déclaration de financement : Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

References:

1. Adjovu, G., Stephen, H., James, D., & Ahmad, S. (2023). Overview of the Application of Remote Sensing in Effective Monitoring of Water Quality Parameters. *Remote Sens.*, 15, 1938. <https://doi.org/10.3390/rs15071938>.
2. Arabi, B., Salama, M., Pitarch, J., & Verhoef, W. (2020). Integration of in-situ and multi-sensor satellite observations for long-term water quality monitoring in coastal areas. *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111632>
3. Bangira, T., Matongera, T., Mabhaudhi, T., & Mutanga, O. (2023). Remote sensing-based water quality monitoring in African reservoirs, potential and limitations of sensors and algorithms: A systematic

- review. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103536>
4. Batina, A., & Krtalić, A. (2024). Integrating Remote Sensing Methods for Monitoring Lake Water Quality: A Comprehensive Review. *Hydrology*. <https://doi.org/10.3390/hydrology11070092>
 5. Bkhaita, M., & Faraj, A. (2025). La sécurité hydrique: un nouveau paradigme pour la gestion de l'eau au Maroc. *Geopolitics and Geostrategic Intelligence*, 6(1), 42-64.
 6. Carlson, R.E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22(2), 361–369. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>
 7. Chen, F., Li, S., & Song, K. (2024). Remote sensing of lake chlorophyll-a in Qinghai-Tibet Plateau responding to climate factors: Implications for oligotrophic lakes. *Ecological Indicators*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111674>
 8. Chen, L., Liu, L., Liu, S., Shi, Z., & Shi, C. (2025). The Application of Remote Sensing Technology in Inland Water Quality Monitoring and Water Environment Science: Recent Progress and Perspectives. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs17040667>
 9. Cogels, F., Coly, A., & Niang, A. (1997). Impact of Dam Construction on the Hydrological regime and quality of a Sahelian Lake In The River Senegal Basin. *Regulated Rivers-research & Management*, 13, 27-41. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1646\(199701\)13:1](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1646(199701)13:1)
 10. Cogels, F., Frabouiet-Jussia, S., & Varis, O. (2001). Multipurpose use and water quality challenges in Lac de Guiers (Senegal). *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 44 6, 35-46. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0335>
 11. Deng, Y., Zhang, Y., Pan, D., Yang, S., & Gharabaghi, B. (2024). Review of Recent Advances in Remote Sensing and Machine Learning Methods for Lake Water Quality Management. *Remote. Sens.*, 16, 4196. <https://doi.org/10.3390/rs16224196>.
 12. Diop, S., Wade, S., & Tijani, M. N. (2008). Analysis of Meris Data for assessing the water quality in Lake Guiers (Senegal): Preliminary results.
 13. Djiby, S., Diekkruiger, B., Gaye, A., & Gaye, A. (2017). Assessment of Hydrologic Alteration within Ecosystem in a Sahalian Shallow Lake: Lake Guiers, Senegal. *Modern Environmental Science and Engineering*, 3, 184-199. [https://doi.org/10.15341/mese\(2333-2581\)/03.03.2017/007](https://doi.org/10.15341/mese(2333-2581)/03.03.2017/007)
 14. Guimarães, T., Veronez, M., Koste, E., Gonzaga, L., Bordin, F., Inocencio, L., Larocca, A., De Oliveira, M., De Castro Vitti, D., &

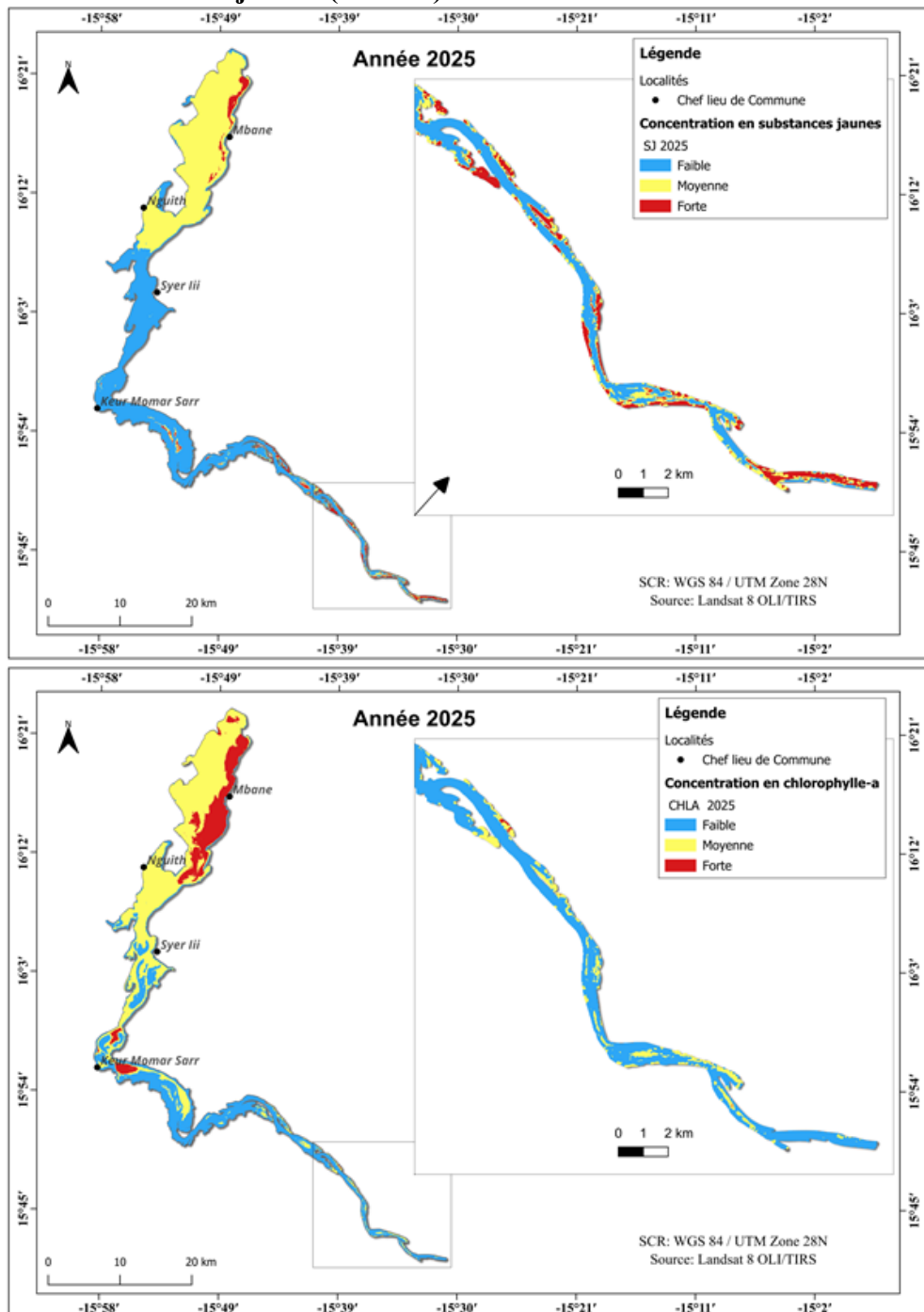
- Mauad, F. (2017). An Alternative Method of Spatial Autocorrelation for Chlorophyll Detection in Water Bodies Using Remote Sensing. *Sustainability*, 9, 1-14. <https://doi.org/10.3390/su9030416>.
15. Jenny, J., Anneville, O., Arnaud, F., Baulaz, Y., Bouffard, D., Domaizon, I., Bocaniov, S., Chèvre, N., Dittrich, M., Dorioz, J., Dunlop, E., Dur, G., Guillard, J., Guinaldo, T., Jacquet, S., Jamoneau, A., Jawed, Z., Jeppesen, E., Krantzberg, G., Lenters, J., Leoni, B., Meybeck, M., Nava, V., Nöges, T., Nöges, P., Patelli, M., Pebbles, V., Perga, M., Rasconi, S., Ruetz, C., Rudstam, L., Salmaso, N., Sapna, S., Straile, D., Tammeorg, O., Twiss, M., Uzarski, D., Ventelä, A., Vincent, W., Wilhelm, S., Wängberg, S., & Weyhenmeyer, G. (2020). Scientists' Warning to Humanity: Rapid degradation of the world's large lakes. *Journal of Great Lakes Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2020.05.006>
 16. Kritzberg, E., Hasselquist, E., Škerlep, M., Löfgren, S., Olsson, O., Stadmark, J., Valinia, S., Hansson, L., & Laudon, H. (2019). Browning of freshwaters: Consequences to ecosystem services, underlying drivers, and potential mitigation measures. *Ambio*, 49, 375 - 390. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01227-5>
 17. Liu, D., Du, Y., Yu, S., Luo, J., & Duan, H. (2020). Human activities determine quantity and composition of dissolved organic matter in lakes along the Yangtze River. *Water research*, 168, 115132. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115132>
 18. Lin L, Yang H and Xu X (2022). Effects of Water Pollution on Human Health and Disease Heterogeneity: A Review. *Front. Environ. Sci.* 10:880246. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.880246>
 19. Mashala, M., Dube, T., Mudereri, B., Ayisi, K., & Ramudzuli, M. (2023). A Systematic Review on Advancements in Remote Sensing for Assessing and Monitoring Land Use and Land Cover Changes Impacts on Surface Water Resources in Semi-Arid Tropical Environments. *Remote. Sens.*, 15, 3926. <https://doi.org/10.3390/rs15163926>
 20. Misteli, B., Pannard, A., Aasland, E., Harpenslager, S., Motitsoe, S., Thiemer, K., Llopis, S., Coetzee, J., Hilt, S., Köhler, J., Schneider, S., Piscart, C., & Thiébaud, G. (2022). Short-term effects of macrophyte removal on aquatic biodiversity in rivers and lakes. *Journal of environmental management*, 325 Pt A, 116442. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116442>
 21. Naderian, D., Noori, R., Kim, D., Jun, C., Bateni, S., Woolway, R., Sharma, S., Shi, K., Qin, B., Zhang, Y., Jeppesen, E., & Maberly, S. (2025). Environmental controls on the conversion of nutrients to

- chlorophyll in lakes. *Water research*, 274, 123094.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123094>
22. Ngamile, S., Madonsela, S., & Kganyago, M. (2025). Trends in remote sensing of water quality parameters in inland water bodies: a systematic review. *Frontiers in Environmental Science*. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1549301>
 23. Ogilvie, A., Fall, C., Bodian, A., Martin, D., Bruckmann, L., Dia, D., Leye, I., Ndiaye, P., Soro, D., Danumah, J., Bader, J., & Poussin, J. (2025). Surface water and flood-based agricultural systems: Mapping and modelling long-term variability in the Senegal river floodplain. *Agricultural Water Management*. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109254>
 24. Organisation Mondiale de la Santé, (2025). *Stratégie pour la santé dans le monde 2025-2028–Faire progresser l'équité et la résilience dans un monde en proie aux turbulences: quatorzième programme général de travail*. World Health Organization. <https://www.who.int/fr/publications/i/item/9789240101012>
 25. Sagan, V., Peterson, K., Maimaitijiang, M., Sidike, P., Sloan, J., Greeling, B., Maalouf, S., & Adams, C. (2020). Monitoring inland water quality using remote sensing: potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing. *Earth-Science Reviews*, 205, 103187. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103187>.
 26. Sherbo, B., Tonin, J., Paterson, M., Hann, B., Kozak, J., & Higgins, S. (2023). The effects of terrestrial dissolved organic matter on phytoplankton biomass and productivity in boreal lakes. *Freshwater Biology*. <https://doi.org/10.1111/fwb.14178>
 27. Shuvo, A., O'Reilly, C., Blagrove, K., Ewins, C., Filazzola, A., Gray, D., Mahdiyan, O., Moslenko, L., Quinlan, R., & Sharma, S. (2021). Total phosphorus and climate are equally important predictors of water quality in lakes. *Aquatic Sciences*, 83, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s00027-021-00776-w>
 28. Sigopi, M., Shoko, C., & Dube, T. (2024). Advancements in remote sensing technologies for accurate monitoring and management of surface water resources in Africa: an overview, limitations, and future directions. *Geocarto International*, 39. <https://doi.org/10.1080/10106049.2024.2347935>
 29. Valdivia, A., De Stefano, L., Ferraro, G., Gianello, D., Ferral, A., Dogliotti, A., Reissig, M., Gereá, M., Queimaliños, C., & Pérez, G. (2024). Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter Spatio-Temporal Variability in North Andean Patagonian Lakes Using

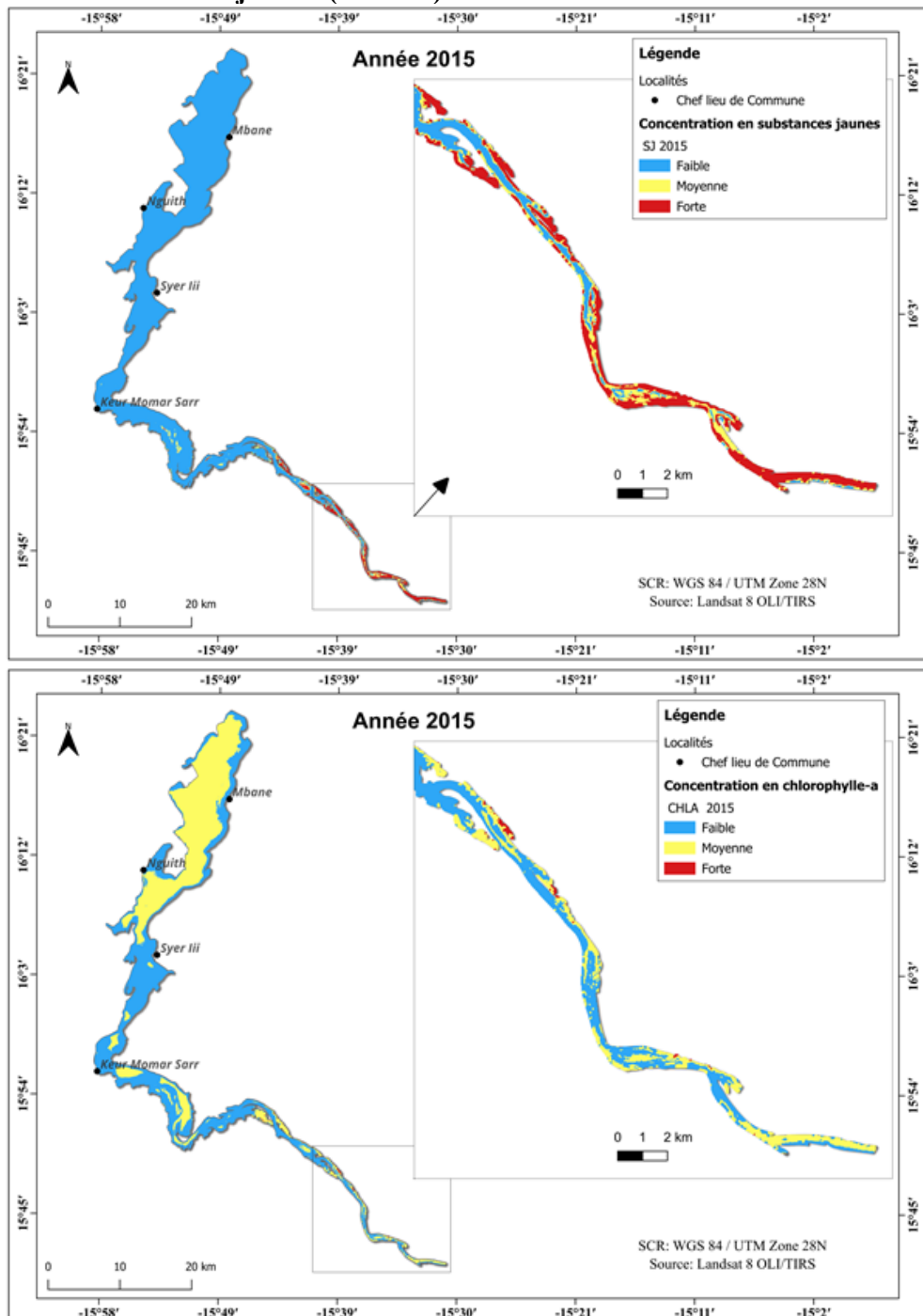
- Remote Sensing Information and Environmental Analysis. *Remote Sens.*, 16, 4063. <https://doi.org/10.3390/rs16214063>
30. Wen, Z., Shang, Y., Song, K., Liu, G., Hou, J., Lyu, L., Tao, H., Li, S., He, C., Shi, Q., & He, D. (2022). Composition of dissolved organic matter (DOM) in lakes responds to the trophic state and phytoplankton community succession. *Water research*, 224, 119073. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119073>
31. Yang, Y., Zhang, X., Gao, W., Zhang, Y., & Hou, X. (2023). Improving lake chlorophyll-a interpreting accuracy by combining spectral and texture features of remote sensing. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 83628-83642. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28344-9>.
32. Zhang, Y., Van Dijk, M., Liu, M., Zhu, G., & Qin, B. (2009). The contribution of phytoplankton degradation to chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in eutrophic shallow lakes: field and experimental evidence.. *Water research*, 43 18, 4685-97. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.07.024>
33. Zhang, Y., Zhou, Y., Shi, K., Qin, B., Yao, X., & Zhang, Y. (2018). Optical properties and composition changes in chromophoric dissolved organic matter along trophic gradients: Implications for monitoring and assessing lake eutrophication. *Water research*, 131, 255-263. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.051>

Appendix

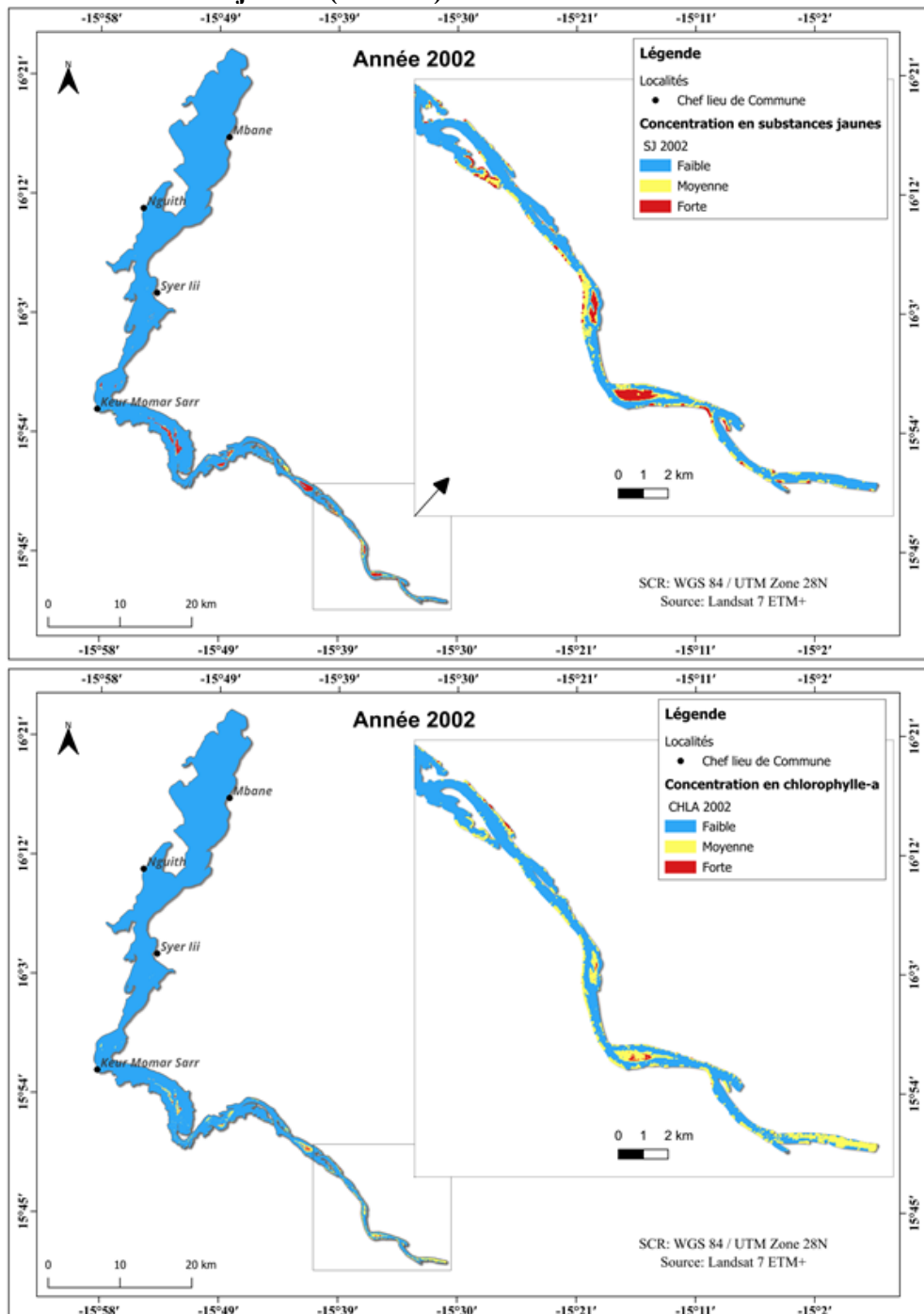
1. Cartes de la répartition spatiale de la chlorophylle-a (Chl-a) et des substances jaunes (CDOM) dans le lac de Guiers en 2025.



2. Cartes de la répartition spatiale de la chlorophylle-a (Chl-a) et des substances jaunes (CDOM) dans le lac de Guiers en 2015.



3. Cartes de la répartition spatiale de la chlorophylle-a (Chl-a) et des substances jaunes (CDOM) dans le lac de Guiers en 2002.



4. Cartes de la répartition spatiale de la chlorophylle-a (Chl-a) et des substances jaunes (CDOM) dans le lac de Guiers en 1995.

