

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique Et Populaire

Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique

Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté Des Sciences De La Nature Et De La Vie Et Sciences De La Terre Et De L'univers



Mémoire de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Ecologie et Environnement

Spécialité : Biodiversité et Environnement

DEPARTEMENT D'ECOLOGIE ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT

**Thème : Impact de la sécheresse sur les zones humides
Lentique dans le Nord-Est Algérien : Bilan des Quarante
Dernières Années**

Présenté par :

AZAIZIA Nada

Membres de jury

Président (e) : **M^{me}. Mesbah Amel**

MCB

Université de Guelma

Examineur : **M^r. Atoussi Sadek**

Prof

Université de Guelma

Encadrent : **M^r. Zebba Rabah**

MCA

Université de Guelma

Année universitaire 2024 / 2025

Dédicaces

Avec l'aide de Dieu tout-puissant, j'ai eu le plaisir d'achever ce modeste travail, que je dédie tout particulièrement à mon père, ABD EL KADER, dont le soutien indéfectible et l'encouragement constant ont été des sources de motivation inestimables tout au long de mes études.

Je tiens également à rendre hommage à celle qui m'a donné la vie et qui m'éclaire jour après jour : ma très chère mère, Hassiba, qui a toujours été à mes côtés et m'a soutenu dans chaque étape de mon parcours.

Je n'oublie pas mes frères et sœurs : Adem, Ahmed Yacine, Meriem et Issra, qui ont partagé avec moi cette aventure.

Une dédicace spéciale va à mes amies et mes cousines, qui m'apportent leur amour et leur aide au quotidien, ainsi qu'à toutes les personnes, de près ou de loin, qui m'ont souhaité réussite et épanouissement dans ma future carrière professionnelle.

Remerciements

Nous remercions tout d'abord Allah tout-puissant de nous avoir donnée la force et

L'aide pour réaliser ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, Je suis reconnaissante envers les membres du jury, le président **Dr. Mesbah A** et l'examineur **Prof. Atoussi S** pour leur temps, leur analyse minutieuse et leurs remarques constructives, qui ont permis d'améliorer la qualité de ce mémoire.

Je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères à mon encadrant de mémoire

Dr. ZEBSA Rabah pour son accompagnement exceptionnel, ses conseils judicieux et son soutien constant tout au long de cette recherche. Sa disponibilité, son expertise et ses remarques pertinentes ont été des facteurs essentiels à la réussite de ce travail.

Je tiens également à remercier chaleureusement mon co- encadrant de mémoire **Mme CHORFI Amira**, pour ses précieux conseils et son aide précieuse. Son soutien et ses remarques éclairées ont grandement enrichi mon travail et m'ont permis de surmonter plusieurs défis.

Je n'oublie pas mes enseignants et mes collègues au département de l'écologie et de l'environnement, dont les échanges enrichissants et les encouragements m'ont motivée tout au long de mon parcours.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma gratitude à ma famille et à mes amis pour leur soutien moral, leur patience et leur compréhension, sans lesquels ce travail n'aurait pas été possible. Leur présence constante m'a apporté une grande force et m'a permis de mener à bien ce projet.

Résumés

La présente étude a été menée dans le nord-est de l'Algérie, au sein de cinq zones humides classées comme sites Ramsar. L'objectif principal de cette recherche est d'analyser les impacts environnementaux sur ces écosystèmes en utilisant des méthodes de télédétection, de cartographie, ainsi que des indices d'évaluation de la qualité de l'eau dérivés d'images satellitaires. Les résultats obtenus mettent en évidence les effets du changement climatique et des activités anthropiques sur la santé de ces écosystèmes aquatiques, notamment à travers une diminution des surfaces en eau et une aggravation des conditions de sécheresse au fil des années. Une corrélation négative significative a été détectée entre le PDSI (Palmer Drought Severity Index) et le NDCI (Normalized Difference Chlorophyll Index), suggérant que des conditions plus sèches sont associées à des concentrations accrues de chlorophylle, ce qui pourrait refléter une prolifération algale en période de sécheresse. Cette recherche met en lumière l'importance écologique cruciale des zones humides, en tant qu'écosystèmes indispensables à la biodiversité et à la régulation du climat. Les données recueillies indiquent des menaces sérieuses liées au changement environnemental et aux interventions humaines, nécessitant la mise en place urgente de mesures de conservation. Il est impératif de promouvoir des stratégies durables afin de protéger ces habitats et d'assurer leur résilience face aux défis futurs.

Mots-clés : indices NDTI ; indices NDCI ; GIS ; Site Ramsar ; Changement climatique. Écosystèmes aquatiques,

Abstract

This study was conducted in northeastern Algeria, within five wetlands classified as Ramsar sites. The main objective of this research is to analyze the environmental impacts on these ecosystems using remote sensing and mapping methods, as well as water quality assessment indices derived from satellite images. The results obtained highlight the effects of climate change and anthropogenic activities on the health of these aquatic ecosystems, particularly through a decrease in water surfaces and a worsening of drought conditions over the years. A significant negative correlation was detected between the PDSI (Palmer Drought Severity Index) and the NDCI (Normalized Difference Chlorophyll Index), suggesting that drier conditions are associated with increased chlorophyll concentrations, which could reflect algal blooms during drought periods. This research highlights the crucial ecological importance of wetlands, as ecosystems essential for biodiversity and climate regulation. The data collected indicate serious threats from environmental change and human intervention, requiring urgent conservation measures. It is imperative to promote sustainable strategies to protect these habitats and ensure their resilience to future challenges.

Keywords: NDTI index; NDCI index; GIS; Ramsar site; Climate change. Aquatic ecosystems.

ملخص

أُجريت هذه الدراسة في شمال شرق الجزائر، ضمن خمس مناطق رطبة مُصنّفة ضمن مواقع رامسار. يهدف هذا البحث بشكل رئيسي إلى تحليل الآثار البيئية على هذه النظم البيئية باستخدام تقنيات الاستشعار عن بُعد ورسم الخرائط، بالإضافة إلى مؤشرات تقييم جودة المياه المُستمدّة من صور الأقمار الصناعية. تُسلّط النتائج المُتحصّل عليها الضوء على آثار تغيّر المناخ والأنشطة البشرية على صحة هذه النظم البيئية المائية، لا سيما من خلال انخفاض المسطحات المائية وتفاقم ظروف الجفاف على مرّ السنين. وقد رُصد ارتباط سلبي كبير بين مؤشر بالمر لشدة الجفاف (PDSI) ومؤشر الكلوروفيل المُعدّل للفرق (NDCI)، مما يُشير إلى أن الظروف الأكثر جفافاً ترتبط بزيادة تركيزات الكلوروفيل، مما قد يعكس ازدهار الطحالب خلال فترات الجفاف. يُسلّط هذا البحث الضوء على الأهمية البيئية الحاسمة للأراضي الرطبة، باعتبارها نظاماً بيئياً أساسية للتنوع البيولوجي وتنظيم المناخ. تُشير البيانات المُجمّعة إلى تهديدات خطيرة ناجمة عن التغير البيئي والتدخل البشري، مما يتطلب تدابير حفظ عاجلة. من الضروري تعزيز استراتيجيات مستدامة لحماية هذه الموائل وضمان صمودها في وجه التحديات المستقبلية.

الكلمات المفتاحية: مؤشرات المؤشر الوطني لتغير المناخ؛ مؤشرات المؤشر الوطني لتغير المناخ؛ نظم المعلومات

الجغرافية؛ موقع رامسار؛ تغير المناخ. النظم الإيكولوجية المائية،

Sommaire

Dédicaces

Remerciements

Résumés

Liste des figures

Listes des tableaux

Listes des symboles et abréviations

Introduction générale..... 1

Chapitre 1 :Matériels et Méthodes5

1.1 Description des sites d'études6

1.2 Collecte des données12

1.3 Analyses Statistiques13

Chapitre 2 : Résultats.....14

2.1 Modèles spatiotemporels de l'indice de végétation et des variables climatiques 15

2.2 Indicateurs spatiotemporels de la qualité de l'eau des zones humides19

2.3 Changement temporel de la surface d'eau en relation avec le climat21

2.4 Relations entre les indices de qualité de l'eau et les variables climatiques.....27

Chapitre 3 : Discussion générale.....29

Conclusion et perspectives.....33

Bibliographies36

Liste des figures

Figure 1 Carte géographique zones humides étudiées, à savoir : (A) Guérbes Sanhadja, (B) Lac Fetzara, (C) Lac Beni Balaed, (D) Lac Tonga et (E) Lac des Oiseaux.	7
Figure 2 Modèle temporel de la température maximale annuelle (Tmax) (a) et des précipitations (b) dans les cinq zones humides de 1984 à 2024. Les lignes représentent une régression loess et les bandes indiquent les erreurs standards.....	18
Figure 3 . Évolution temporelle de l'indice PDSI annuel dans les cinq zones humides étudiées de 1984 à 2024. Les lignes représentent une régression loess et les bandes indiquent les erreurs standards.	18
Figure 4 Changement temporel de l'indice NDTI annuel (a) et de l'indice NDCI (b) dans les cinq zones d'étude des zones humides de 1984 à 2024. Les lignes représentent une régression loess et les bandes indiquent les erreurs standards.....	21
Figure 5 Changement temporel de la surface d'eau de la zone humide de Beni Belaid de 1984 à 2024.	22
Figure 6 . Évolution temporelle de la surface d'eau de la zone humide de Guerbes Sanhadja de 1984 à 2024.....	23
Figure 8 Évolution temporelle de la surface d'eau du lac des Oiseaux de 1984 à 2024.	24
Figure 7 Évolution temporelle de la surface d'eau du lac Fetzara de 1984 à 2024.	24
Figure 9 Évolution temporelle de la surface d'eau du lac Tonga de 1984 à 2024.	25
Figure 10 Évolution temporelle de la surface d'eau des zones humides (a), effet des précipitations (b) et indice PDSI sur la surface d'eau des sites d'étude.....	26
Figure 11 Matrice de corrélation de Pearson montrant les interrelations entre le NDCI, le NDTI, le PDSI et les précipitations des sites humides étudiés.....	28

Listes des tableaux

Tableau 1 Statistiques résumées du modèle linéaire général évaluant le changement spatiotemporel annuel des précipitations, de l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI) et de l'Indice de Sécheresse PDSI durant la période d'étude. Le site Guerbes_San.....	15
Tableau 2 S1. Résumé du test de Tukey comparant l'évolution des précipitations, de l'indice NDVI et de l'indice PDSI au fil du temps entre différents sites de zones humides.	16
Tableau 3 Statistiques résumées du modèle linéaire général évaluant le changement spatiotemporel annuel des indices NDTI et NDCI pendant la période d'étude. Le site Guerbes_Sanhadja est utilisé comme niveau de référence pour le calcul des contrastes	19
Tableau 4 S2. Résumé du test de Tukey comparant l'évolution des indices NDTI et NDCI au fil du temps entre différents sites humides.....	20
Tableau 5 Changement temporel de l'eau de surface en relation avec le climat.....	22
Tableau 6 . Matrice de corrélation de Pearson entre l'indice de qualité de l'eau et les variables climatiques.	28

Listes des symboles et abréviations

*** indique une probabilité significative

*** $p < 0.001$.

** $p < 0.01$.

* $p \leq 0.05$.

NDVI : indice de végétation par différence normalisé.

PDSI : indice Palmer de sévérité de la sécheresse.

NDTI : Indice de différence de travail du sol normalisé.

NDCI : Différence normalisée de l'indice de chlorophylle.

GIS : Système d'Information Géographique

Introduction générale

À l'heure actuelle, la problématique du changement climatique représente un enjeu scientifique complexe, principalement lié à l'effet de serre. Ce phénomène a des implications majeures sur l'environnement, l'énergie, le développement et les intérêts économiques (Amy, 2014). Il se manifeste par des fluctuations à long terme des températures et des conditions météorologiques, imputables tant à des causes naturelles qu'aux activités humaines (Cheng *et al.*, 2022).

Le changement climatique se traduit notamment par une hausse des températures et l'intensification des vagues de chaleur, mettant en péril la santé humaine, l'agriculture et les écosystèmes (Keita, 2024). Il contribue également à l'aggravation de la résistance aux antimicrobiens, représentant une menace croissante pour la santé publique du fait de l'augmentation des infections résistantes (Abbass *et al.*, 2022). De plus, il a un impact direct sur les zones humides, par l'augmentation de l'évaporation, la diminution des précipitations et l'élévation des températures (Hassan *et al.*, 2024). Ces changements affectent la distribution des zones humides intérieures, bien que leurs effets précis restent encore incertains (Grill *et al.*, 2015; Pekel *et al.*, 2016). Ces milieux, inondés de manière permanente ou saisonnière, dépendent fortement de la dynamique des eaux de surface, elle-même influencée à petite échelle (Xu *et al.*, 2024).

La dynamique des eaux de surface est étroitement liée au régime des eaux souterraines, lequel est affecté par le climat, la végétation et les activités humaines, telles que l'extraction excessive. Cela met en lumière la complexité et la non-linéarité des interactions entre le système climatique et les réponses hydrologiques (Beven, 2001; Rial *et al.*, 2004). Par ailleurs, certaines zones humides ne nécessitent pas une inondation permanente : des sols simplement saturés peuvent suffire à maintenir un écosystème humide. Dans ce contexte, plusieurs études basées sur des observations satellitaires à l'échelle sub-kilométrique ont été menées (Pekel *et al.*, 2016; Pickens *et al.*, 2020; Schroeder *et al.*, 2015).

Une zone humide est définie comme un écosystème où l'eau constitue un facteur clé pour la vie végétale et animale, se formant lorsque la nappe phréatique affleure ou que le sol est inondé (Ramsar, 2016). Ces milieux complexes et fragiles sont essentiels pour la

biodiversité et possèdent une grande valeur écologique, économique et sociale (Khadoumi *et al.*, 2022) Bien qu'elles ne couvrent qu'environ 6 % de la surface terrestre, les zones humides fournissent près de 40 % des services écosystémiques mondiaux (Karamidehkordi *et al.*, 2024). À l'échelle internationale, elles sont les seuls écosystèmes à bénéficier d'une convention spécifique : la Convention de Ramsar. On y recense plus de 2 500 zones humides d'importance internationale, couvrant plus de 2,5 millions de km² – soit une superficie supérieure à celle du Mexique. L'Europe détient le plus grand nombre de sites Ramsar (1 004 soit 44 %), mais seulement 6 % de la superficie totale. En comparaison, l'Afrique (397 sites) et l'Amérique du Sud (146 sites) comptent respectivement pour 17 % et 6 % du nombre de sites, mais couvrent 48 % (110 millions d'hectares) et 17 % (39,6 millions d'hectares) de la superficie protégée. L'Asie (368 sites) et l'Amérique du Nord (309 sites) représentent 16 % et 13 % des sites, avec 27,5 et 28,9 millions d'hectares respectivement. L'Océanie est la moins représentée avec 79 sites (4 %) (Davidson *et al.*, 2018 ; [Gardner et Finlayson, 2018](#)).

En Algérie, les zones humides couvrent environ 3 032 813 hectares, ce qui place le pays au 23^e rang mondial en termes de superficie ([Ramsar, 2016](#)). Parmi les plus importantes figurent celles situées dans le nord-est, à proximité d'El Kala : le marais de Tonga (2 700 ha), le lac Oubeïra (2 200 ha), le lac Mellah (800 ha, eaux saumâtres) et Garaet El Mekhada (5 600 ha, peuplé notamment de *Scirpus maritimus*) (LOUASSA *et al.*, 1983). La wilaya d'Oum El Bouaghi se distingue également par la richesse de ses zones humides, notamment la Sebkha d'Ezzemoul (6 765 ha), classée Ramsar depuis 2009. Ce site est essentiel pour la reproduction des flamants roses de Méditerranée et accueille diverses espèces d'oiseaux et de mammifères tels que le chacal et le renard roux (Boulkhssaim *et al.*, 2016).

Les zones humides font partie des écosystèmes les plus essentiels au maintien de l'équilibre écologique et à la survie humaine (Zhang *et al.*, 2025). Elles assurent la purification de l'eau, la régulation des crues et des sécheresses, la recharge des nappes phréatiques, le stockage du carbone (Mars *et al.*, 2023), et servent d'habitats à une riche biodiversité, incluant les arthropodes, par exemple habitats pour les arthropodes terrestres (Batzner et 2020), et une avifaune diversifiée, tant nicheuse que migratrice (Mars *et al.*, 2023). Les zones humides artificielles remplissent également des fonctions

écologiques importantes en milieu urbain, telles que le traitement des eaux usées et la gestion des eaux pluviales (Kingsford *et al.*, 2021), ainsi que la rétention des nutriments pour limiter l'eutrophisation (Hickey *et al.*, 2018).

Cependant, plus de 50 % des zones humides naturelles ont été dégradées ou ont disparu au cours du dernier siècle (Das et Basu, 2020). Elles sont menacées par l'urbanisation croissante (Azonningbo *et al.*, 2021). le drainage artificiel et le surpâturage (Li *et al.*, 2021). la pollution, la surexploitation des ressources biologiques, l'aquaculture (Xu *et al.*, 2019). et l'utilisation de produits chimiques agricoles (Ahidur, 2016). L'activité humaine contribue ainsi à la réduction de leur superficie, leur fragmentation et la perte de biodiversité (Xie *et al.*, 2024). Le changement climatique, en modifiant les régimes hydrologiques, aggrave cette situation (Erwin, 2009). engendrant des altérations physico-chimiques dues aux événements climatiques extrêmes tels que fortes précipitations ou vagues de chaleur (Duran, 2023), affectant leur biogéochimie et leur fonctionnement (Salimi *et al.*, 2021). Les conséquences incluent la raréfaction de l'eau, la recrudescence des sécheresses et des inondations. Des années de sécheresse extrême deviennent plus fréquentes, entraînant une régression significative des zones humides (Xiong *et al.*, 2023).

Au cours des dernières décennies, l'utilisation croissante des technologies de télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG) a permis de suivre efficacement les changements d'usage des sols et de la couverture terrestre. L'Indice de Végétation Normalisé (NDVI) évalue la santé de la végétation, tandis que l'Indice de Disponibilité en Eau Normalisé (NDWI) permet de mesurer la disponibilité en eau (Faruque *et al.*, 2022). Grâce aux progrès réalisés depuis les années 1970, des outils comme le Lidar ou le radar à synthèse d'ouverture (SAR) offrent une cartographie précise des zones humides (Wu, 2017). Cette évaluation spatiale constitue une base essentielle pour leur conservation, leur restauration et leur gestion durable (Shafi *et al.*, 2023).

Cette étude examine l'impact de la sécheresse sur les zones humides lenticques du nord-est algérien dans le but de :

1- Analyser le pattern spatiotemporel de la végétation autour des sites d'étude ainsi que la variation des facteurs climatiques.

2- Évaluer les changements spatiotemporels de la qualité des eaux dans les sites d'étude à l'aide des indices NDTI et NDCI.

3- Étudier l'effet du changement climatique (précipitations et indice de sécheresse PDSI) sur la superficie des plans d'eau dans les zones humides étudiées.

4- Examiner la relation entre la qualité des eaux des zones humides étudiées et les facteurs climatiques.

Chapitre 1 : **Matériels et Méthodes**

1. Matériel et méthodes

1.1 Description des sites d'études

L'étude a été réalisée dans le nord-est de l'Algérie, couvrant cinq zones humides importantes classées Ramsar, réparties sur quatre wilayas : Skikda (Guébes Sanhadja), Annaba (Lac Fetzara), El Tarf (Lac Tonga, Lac Fetzara, Lac des Oiseaux) et Jijel (Lac Beni Balaed). Le tableau ci-dessus présente la description de ces sites.

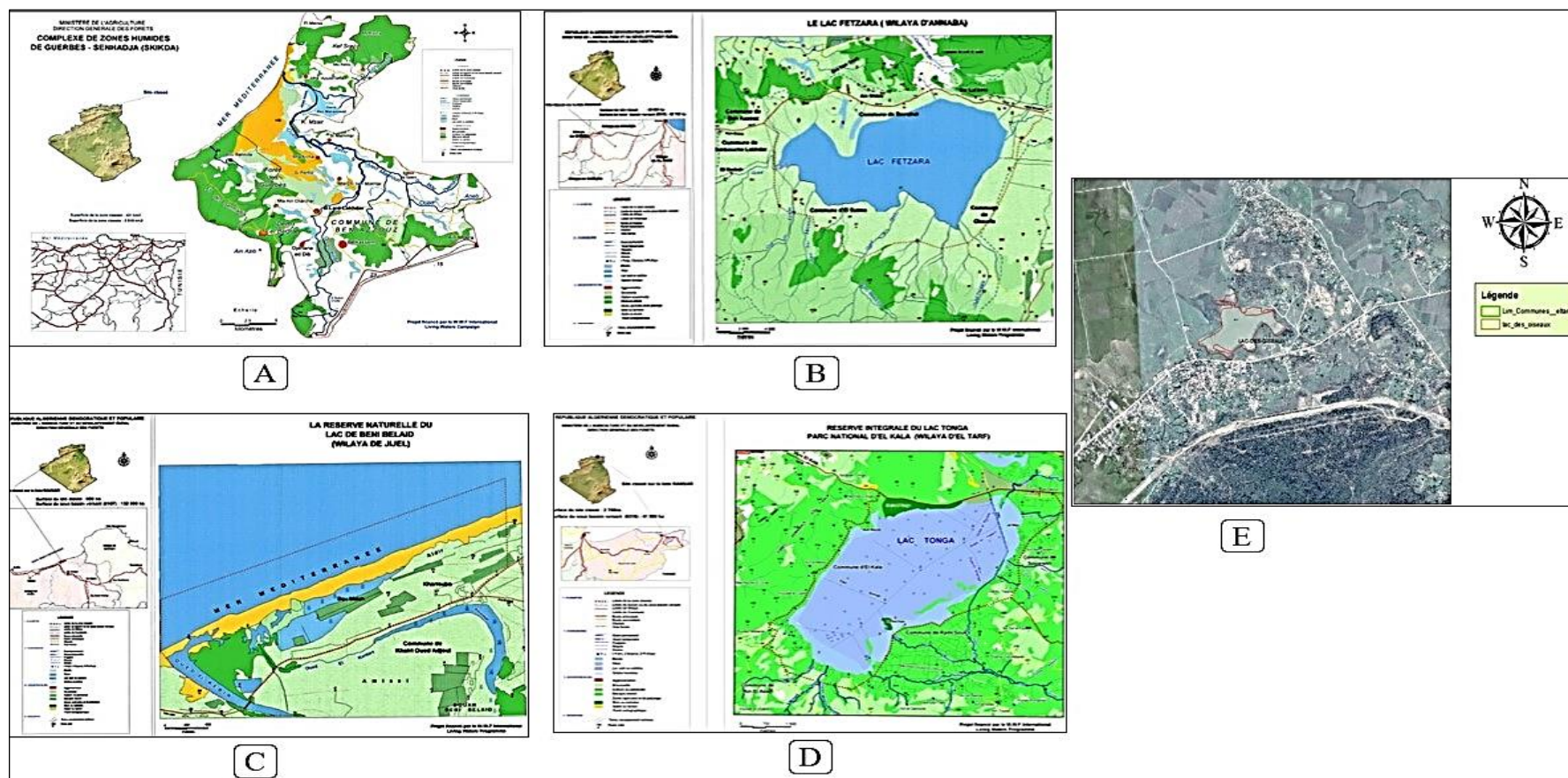


Figure.1 Illustrant les différentes zones humides étudiées, à savoir : (A) Guérbes Sanhadja, (B) Lac Fetzara, (C) Lac Beni Balaed, (D) Lac Tonga et (E) Lac des Oiseaux.

Zone humide	Description	Coordonnées GPS	Superficie	Caractéristique d'eau	Climatologie	Biodiversité
Guerbes Sanhadja	Le complexe de zones humides de Guerbes-Sanhadja, situé dans l'Est de l'Algérie entre Skikda et Chetaibi, est composé de dépôts éoliens et alluviaux provenant de trois bassins versants. Ce massif dunaire, contenant environ 40 hectomètres cubes d'eau, abrite de nombreuses dépressions et vallées, formant 31 sites humides principaux, tels que Garaet Haouas , Garaet Boumaïza et Lac Sidi Fritis . (Razkallah Zahra, 2013) classé site Ramasser depuis 2001 [1].	36°45'- 37°1' N et 7°13'- 7°30' E	42.100 ha	Eau douce	un climat humide de moyenne latitude caractérisé par des hivers doux, ainsi qu'une sous-région climatique méditerranéenne avec des étés chauds.	Le site abrite environ 234 espèces de plantes , 50 espèces d'oiseaux et 27 espèces de libellules . Il est essentiel pour les oiseaux migrateurs, servant de lieu de nidification pour <i>Oxyura leucocephala</i> et <i>Aythya nyroca</i> , ainsi que pour l'anguille européenne [1].
Lac Fetzara	Le lac Fetzara, situé à 18 km au sud-ouest d'Annaba, est entouré de plusieurs agglomérations, dont Berrahal au nord et El Eulma au sud. Classé zone humide d'importance internationale par la liste Ramsar depuis 2002, il représente une zone humide méditerranéenne. Sa fonction hydrologique aide à contrôler les crues, à retenir les	36°47'16"N 07°30'32"E	12,000.0 ha	Eau douce	Le climat est méditerranéen tempéré, avec des hivers doux (11°C) et des étés chauds et secs (25°C). La pluviométrie annuelle est de 600 à 700 mm, principalement entre octobre et	Le site abrite plus de 30 000 oiseaux d'eau, notamment des foulques et des espèces d' Anatidae comme l'oie cendrée et le canard siffleur, qui y trouvent leur nourriture [2].

	sédiments et nutriments, et à recharger la nappe phréatique(Mellouk & Aroua, 2015). classé site Ramasser depuis [3].				mars. L'humidité moyenne mensuelle est de 68% à 70%. Les vents dominants incluent le sirocco, présent environ dix-huit fois par an, ainsi que des vents du Nord-Est et Nord-Ouest en hiver, et principalement du Nord-Est en été [3].	
Lac Tonga	Le lac Tonga, près d'El Kala en Algérie, est un site Ramsar et fait partie du Parc national d'El Kala. Ce lac d'eau douce, marécageux en été, est essentiel pour de nombreuses espèces et les populations locales. Mesurant 7,1 km de long et 3,5 km de large, il contribue à la gestion des crues en hiver en retenant les sédiments classé site Ramasser depuis 1983[4].	36°53'N, 08°31'E, altitude 2 m)	2600 ha	Eau douce	Le climat du lac Tonga est méditerranéen, avec des hivers doux, des étés chauds et des précipitations annuelles d'environ 600 mm, surtout en hiver. Le lac bénéficie également d'un bon ensoleillement tout au long de l'année.[4].	Le lac Tonga, avec ses habitats de qualité, abrite une biodiversité riche, notamment une importante colonie d' Ardéidés (hérons et aigrettes) . Sa couverture végétale en mosaïque comprend des hélrophytes comme les scirpes, phragmites et typhas. En hiver, il accueille plus de 25 000 anatidés et foulques , et constitue un site de nidification crucial pour des espèces rares telles que l' Erismature à tête blanche et le Fuligule nyroca [4].

Lac des Oiseaux	Le Lac des Oiseaux, ou Garâat Ettouyou, est situé en Numidie orientale, dans le nord-est de l'Algérie. Réputé pour sa population d'oiseaux hivernants, il s'étend sur 46 ha, dont 35 ha d'eau libre et une profondeur maximale de 0,5 m. Il est classé site Ramasser depuis 1999 [5].	36°46'55"N 08°07'25"E	120,00 ha	Eau douce	La région présente un climat humide de moyenne latitude, avec des hivers doux et un climat méditerranéen caractérisé par des étés brûlants.[5].	Le site possède une biodiversité riche avec environ 200 espèces de végétaux, d'oiseaux et d'insectes , incluant des espèces menacées comme l'érismature à tête blanche et la sarcelle marbrée. 164 érismatures, soit plus de 2 % de la population mondiale, ont été observées. Une étude de 1996 a identifié 31 espèces de plantes , dont 70 % d'hélophytes et 30 % d'hydrophytes [5].
Lac Beni Balaed	Le Lac de Béni-Bélaïd, situé à 32 km à l'est de Jijel en Algérie, se trouve dans la commune d'Oued Adjoul, entouré au nord par la mer Méditerranée, au sud par des terres agricoles et à l'ouest par l'embouchure de l'Oued El Kebir. L'accès se fait par un chemin d'exploitation agricole menant à la route nationale n° 43, reliant Constantine et Jijel. classé site Ramasser depuis 2003 [6].	36°52'43"N 06°06'30"E	600.0 ha	Eau douce	Le site de Béni-Bélaïd possède un bioclimat méditerranéen humide, caractérisé par des précipitations annuelles dépassant 1 100 mm et une température moyenne de 18 °C. [6].	La zone humide de Béni-Bélaïd est riche en biodiversité, abritant de nombreuses espèces végétales rares, dont 32 méditerranéennes, 15 paléotempérées, 15 cosmopolites et 9 tropicales , telles que Jussiena repens et <i>Echinophora spinosa</i> . Elle constitue également un habitat pour une avifaune rare, incluant <i>Porphyrio porphyrio</i> et <i>Aythya nyroca</i> , ainsi que des espèces endémiques comme <i>Pseudophoxinus callensis</i> et <i>Barbus callensis</i> . La loutre <i>Lutra</i>



						<i>lutra</i> y est également présente en grand nombre [6].
--	--	--	--	--	--	--

1.2. Collecte des données

Dans cette étude, cinq zones humides situées dans le nord-est de l'Algérie ont été délimitées et surveillées sur la période 1984-2024 à l'aide de l'indice d'eau par différence normalisée (NDWI). Des images satellites des archives Landsat, notamment Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI et Landsat 9 OLI-2, ont été utilisées pour calculer le NDWI en appliquant la formule :

$$\text{NDWI} = (\text{Vert} - \text{NIR}) / (\text{Vert} + \text{NIR}).$$

Pour Landsat 5/7, les bandes B2 et B4 ont été utilisées, tandis que pour Landsat 8/9, les bandes B3 et B5 ont été appliquées. Un seuil ($\text{NDWI} > 0$) a été défini pour extraire les masses d'eau de surface, qui ont ensuite été vectorisées pour définir les limites des zones humides. Des composites NDWI annuels ont été générés pour chaque année, et les surfaces d'eau ont été estimées à l'aide de calculs de surface basés sur les pixels au sein des polygones de zones humides définies, permettant un suivi à long terme de la dynamique des eaux de surface.

Afin d'évaluer les conditions environnementales influençant l'hydrologie des zones humides, des zones tampons d'un rayon de 1 km ont été créées autour de chaque zone humide. Au sein de ces zones tampons, nous avons extrait les principaux indicateurs climatiques et écologiques de 1984 à 2024. Les données de précipitations proviennent du jeu de données quotidien CHIRPS, tandis que l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer (PDSI) provient du jeu de données GRIDMET. La dynamique de la végétation a été évaluée à l'aide de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) issu des données MODIS MOD13Q1 et Landsat. L'indice de turbidité par différence normalisée (NDTI), dérivé des bandes SWIR1 et rouge, et l'indice de chlorophylle par différence normalisée (NDCI), basé sur les bandes Sentinel-2 RedEdge et rouge (disponibles à partir de 2015), ont été calculés afin de suivre l'évolution de l'utilisation des terres et de la productivité aquatique, respectivement.

Tous les jeux de données ont été traités à l'aide de la plateforme Google Earth Engine (GEE). Les composites temporels (moyenne ou médiane) de chaque indicateur ont été calculés annuellement pour l'ensemble des zones tampons. Des séries chronologiques ont

été construites pour visualiser les tendances et la variabilité interannuelles. L'intégration des indices de télédétection aux paramètres climatiques a permis d'obtenir un aperçu complet de l'état des zones humides et de leur environnement sur quatre décennies. Cette approche offre une méthode évolutive et reproductible pour la surveillance des zones humides et l'analyse des interactions climatiques dans les régions semi-arides.

1.3. Analyses Statistiques :

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R 4.2.2 (Team R Development Core, 2023). La normalité a été vérifiée à l'aide du test de Shapiro-Wilk, les hypothèses d'homogénéité et les profils résiduels des données ont été vérifiés (Zuur *et al*, 2007). Nous avons analysé l'évolution spatiotemporelle de précipitation, l'indice de végétation NDVI, et l'indice de PDSI à l'aide d'un modèle de régression linéaire, et suivi par un test de comparaison entre paire (Site) Tukey test. Le changement spatiotemporel des indices de la qualité des eaux (NDTI et NDCI) a été analysé en utilisant une régression linéaire suivi par un test de comparaison entre paire (entre les sites) Tukey test. Le pattern temporel de la surface des eaux des zones humides et l'effet des autres facteurs tel que précipitation et le PDSI sur l'augmentation et la diminution des surfaces d'eaux ont été analysés par une régression linéaire. Les relations entre les indices de la qualité des eaux et les facteurs climatiques ont été déterminés par une matrice de corrélation de Pearson. Les données ont été présentées sous forme de moyenne avec l'écart type (ET) correspondant. Le seuil minimal de signification retenu est $p < 0,05$.

Chapitre 2 : Résultats

Résultats

1. Modèles spatiotemporels de l'indice de végétation et des variables climatiques

Nos résultats ont montré qu'il y avait une légère augmentation positive (marginale) des précipitations au fil du temps (Tableau 1, Figure 1a), et cette augmentation variait selon les sites (Tableau S1), étant plus élevée à Guerbes Sanhadja. Le lac Fetzara et le lac Tonga ont reçu significativement moins de précipitations durant la période d'étude ($p < 0,001$). L'indice NDVI augmente de 0,00266 par an, ce qui représente une tendance positive hautement significative (Tableau 1, Figure 1b). Des différences ont été observées entre les sites. Le lac Tonga semble être le site le plus verdoyant (Tableau S1). Le lac Fetzara et le lac Beni Balaed présentent les valeurs les plus basses de NDVI, indiquant une couverture végétale réduite. Nos résultats ont montré que l'indice PDSI diminue significativement au fil du temps (Tableau 1, Figure 2). Une pente négative de -0,0636 par an indique une aggravation des conditions de sécheresse au fil des années. Il n'y avait pas de différence entre les sites de zones humides durant la période d'étude. Cela suggère que le changement temporel a une influence plus importante sur le PDSI que la localisation géographique. Il y a eu plus de 8 et 6 occurrences de sécheresse extrême et sévère respectivement dans chaque zone humide étudiée au fil des ans.

Tableau 1 Statistiques résumées du modèle linéaire général évaluant le changement spatiotemporel annuel des précipitations, de l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI) et de l'Indice de Sécheresse PDSI durant la période d'étude. Le site Guerbes_San

Précipitations	Estimation	SE	t value	p value
(Intercept)	-237.86316	176.00159	-1.351	0.178075
Année	0.15782	0.08782	1.797	0.073835.
lac_Beni_Balaed	-6.38025	3.28583	-1.942	0.053580.
lac_des_Oiseaux	-7.31758	3.28583	-2.227	0.027067 *
lac_Fetzara	-13.15796	3.28583	-4.004	8.77e-05 ***

lac_Tonga	-11.36696	3.28583	-3.459	0.000662 ***
NDVI				
(Intercept)	-5.028420	0.370695	-13.565	<2e-16 ***
Année	0.002663	0.000185	14.396	<2e-16 ***
lac_Beni_Balaed	-0.166698	0.006921	-24.087	<2e-16 ***
lac_des_Oiseaux	0.012147	0.006921	1.755	0.0808 .
lac_Fetzara	-0.143431	0.006921	-20.725	<2e-16 ***
lac_Tonga	0.116089	0.006921	16.774	<2e-16 ***
PDSI				
(Intercept)	126.79180	29.81850	4.252	3.26e-05 ***
Année	-0.06364	0.01488	-4.278	2.93e-05 ***
lac_Beni_Balaed	-0.07996	0.55669	-0.144	0.886
lac_des_Oiseaux	-0.14762	0.55669	-0.265	0.791
lac_Fetzara	-0.12916	0.55669	-0.232	0.817
lac_Tonga	-0.23917	0.55669	-0.430	0.668

Tableau 2 S1. Résumé du test de Tukey comparant l'évolution des précipitations, de l'indice NDVI et de l'indice PDSI au fil du temps entre différents sites de zones humides.

Précipitation	Estimation	SE	df	t.ratio	p.value
Guerbes_Sanhadja - lac_Blni_Balaed	6.380	3.29	199	1.942	0.2988
Guerbes_Sanhadja - lac_des_Oiseaux	7.318	3.29	199	2.227	0.1740
Guerbes_Sanhadja - lac_Fetzara	13.158	3.29	199	4.004	0.0008

Guerbes_Sanhadja - lac_Tonga	11.367	3.29	199	3.459	0.0059
lac_Blni_Balaed - lac_des_Oiseaux	0.937	3.29	199	0.285	0.9985
lac_Blni_Balaed - lac_Fetzara	6.778	3.29	199	2.063	0.2405
lac_Blni_Balaed - lac_Tonga	4.987	3.29	199	1.518	0.5523
lac_des_Oiseaux - lac_Fetzara	5.840	3.29	199	1.777	0.3896
lac_des_Oiseaux - lac_Tonga	4.049	3.29	199	1.232	0.7325
lac_Fetzara - lac_Tonga	-1.791	3.29	199	-0.545	0.9824
NDVI					
Guerbes_Sanhadja - lac_Blni_Balaed	0.1667	0.00692	199	24.087	<.0001
Guerbes_Sanhadja - lac_des_Oiseaux	-0.0121	0.00692	199	-1.755	0.4029
Guerbes_Sanhadja - lac_Fetzara	0.1434	0.00692	199	20.725	<.0001
Guerbes_Sanhadja - lac_Tonga	-0.1161	0.00692	199	-16.774	<.0001
lac_Blni_Balaed - lac_des_Oiseaux	-0.1788	0.00692	199	-25.842	<.0001
lac_Blni_Balaed - lac_Fetzara	-0.0233	0.00692	199	-3.362	0.0082
lac_Blni_Balaed - lac_Tonga	-0.2828	0.00692	199	-40.861	<.0001
lac_des_Oiseaux - lac_Fetzara	0.1556	0.00692	199	22.480	<.0001
lac_des_Oiseaux - lac_Tonga	-0.1039	0.00692	199	-15.019	<.0001
lac_Fetzara - lac_Tonga	-0.2595	0.00692	199	-37.499	<.0001

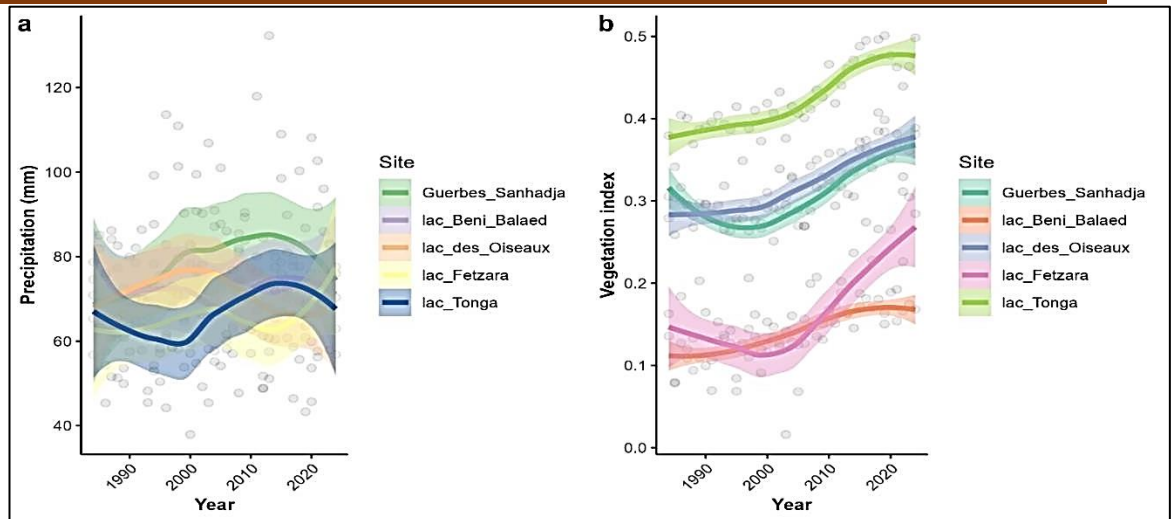


Figure 2 Modèle temporel de la température maximale annuelle (Tmax) (a) et des précipitations (b) dans les cinq zones humides de 1984 à 2024. Les lignes représentent une régression loess et les bandes indiquent les erreurs standards.

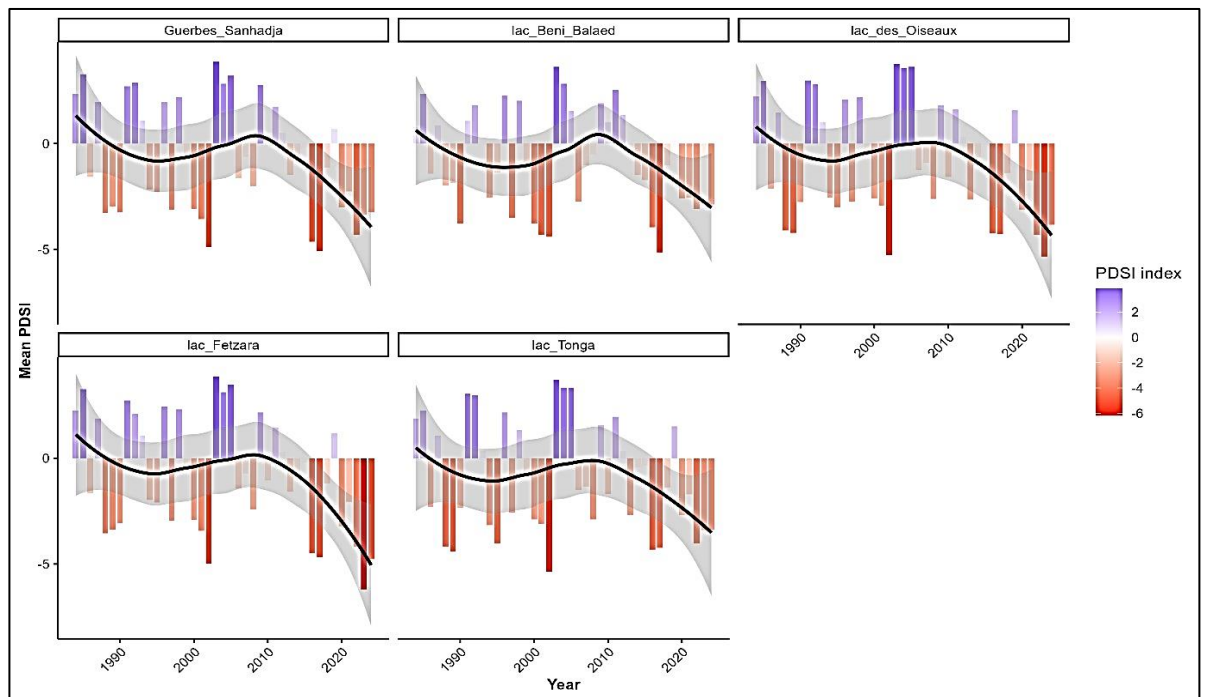


Figure 3 . Évolution temporelle de l'indice PDSI annuel dans les cinq zones humides étudiées de 1984 à 2024. Les lignes représentent une régression loess et les bandes indiquent les erreurs standards.

2. Indicateur spatiotemporel de la qualité de l'eau des zones humides

L'indice NDTI a montré un schéma de diminution au fil du temps avec une pente de 4,4 par an (Tableau 3, Figure 3a), et il différait entre tous les sites, sauf entre Guerbes, le lac des Oiseaux et le lac Fetzara (Tableau S2). Nos résultats ont montré que le lac Beni Balaed et le lac Tonga présentent une turbidité significativement plus faible par rapport au lac Guerbes, dont l'eau est beaucoup plus claire. L'indice NDCI a augmenté au fil du temps avec une pente de 0,001 par an (Tableau 2, Figure 3b). Les différences spécifiques aux sites mettent en évidence une forte variation spatiale de la productivité (biomasse algale) (Tableau S2). Le lac Beni Balaed et le lac Fetzara pourraient avoir une charge en nutriments plus faible, un meilleur drainage ou un impact anthropique réduit. Le lac des Oiseaux pourrait avoir des points chauds d'eutrophisation localisés.

Tableau 3 Statistiques résumées du modèle linéaire général évaluant le changement spatiotemporel annuel des indices NDTI et NDCI pendant la période d'étude. Le site Guerbes_Sanhadja est utilisé comme niveau de référence pour le calcul des contrastes

NDTI	Estimation	SE	t value	p value
(Intercept)	8.778e-01	1.965e-01	4.467	1.33e-05 ***
Année	-4.403e-04	9.805e-05	-4.490	1.20e-05 ***
lac_Beni_Balaed	-1.008e-01	3.669e-03	-27.468	< 2e-16 ***
lac_des_Oiseaux	3.956e-03	3.669e-03	1.078	0.282
lac_Fetzara	-6.051e-03	3.669e-03	-1.649	0.101
lac_Tonga	-6.929e-02	3.669e-03	-18.886	< 2e-16 ***
NDCI				
(Intercept)	-3.1576226	0.5929266	-5.325	2.71e-07 ***
Année	0.0017068	0.0002958	5.769	3.01e-08 ***
lac_Beni_Balaed	-0.3018861	0.0110695	-27.272	< 2e-16 ***
lac_des_Oiseaux	0.0429814	0.0110695	3.883	0.00014 ***

lac_Fetzara	-0.1531299	0.0110695	-13.833	< 2e-16 ***
lac_Tonga	-0.0201549	0.0110695	-1.821	0.07015 .

Tableau 4 S2. Résumé du test de Tukey comparant l'évolution des indices NDTI et NDCI au fil du temps entre différents sites humides.

NDTI	Estimer	SE	df	t.ratio	p.value
Guerbes_Sanhadja - lac_Beni_Balaed	0.10077	0.00367	199	27.468	<.0001
Guerbes_Sanhadja - lac_des_Oiseaux	-0.00396	0.00367	199	-1.078	0.8175
Guerbes_Sanhadja - lac_Fetzara	0.00605	0.00367	199	1.649	0.4679
Guerbes_Sanhadja - lac_Tonga	0.06929	0.00367	199	18.886	<.0001
lac_Beni_Balaed - lac_des_Oiseaux	-0.10473	0.00367	199	-28.547	<.0001
lac_Beni_Balaed - lac_Fetzara	-0.09472	0.00367	199	-25.819	<.0001
lac_Beni_Balaed - lac_Tonga	-0.03149	0.00367	199	-8.582	<.0001
lac_des_Oiseaux - lac_Fetzara	0.01001	0.00367	199	2.728	0.0535
lac_des_Oiseaux - lac_Tonga	0.07324	0.00367	199	19.964	<.0001
lac_Fetzara - lac_Tonga	0.06324	0.00367	199	17.237	<.0001
NDCI					
Guerbes_Sanhadja - lac_Beni_Balaed	0.3019	0.0111	199	27.272	<.0001
Guerbes_Sanhadja - lac_des_Oiseaux	-0.0430	0.0111	199	-3.883	0.0013
Guerbes_Sanhadja - lac_Fetzara	0.1531	0.0111	199	13.833	<.0001
Guerbes_Sanhadja - lac_Tonga	0.0202	0.0111	199	1.821	0.3645

lac_Beni_Balaed - lac_des_Oiseaux	-0.3449	0.0111	199	-31.155	<.0001
lac_Beni_Balaed - lac_Fetzara	-0.1488	0.0111	199	-13.438	<.0001
lac_Beni_Balaed - lac_Tonga	-0.2817	0.0111	199	-25.451	<.0001
lac_des_Oiseaux - lac_Fetzara	0.1961	0.0111	199	17.716	<.0001
lac_des_Oiseaux - lac_Tonga	0.0631	0.0111	199	5.704	<.0001
lac_Fetzara - lac_Tonga	-0.1330	0.0111	199	-12.013	<.0001

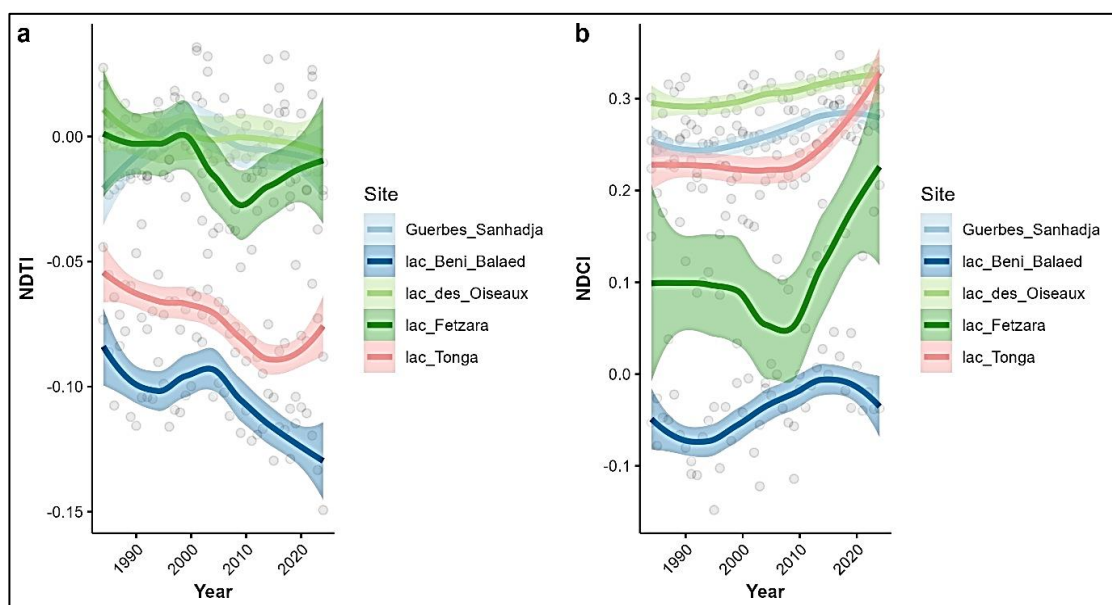


Figure 4 Changement temporel de l'indice NDTI annuel (a) et de l'indice NDCI (b) dans les cinq zones d'étude des zones humides de 1984 à 2024. Les lignes représentent une régression loess et les bandes indiquent les erreurs standards.

3. Changement temporel de l'eau de surface en relation avec le climat

Nos résultats ont montré que la surface d'eau a augmenté, mais pas de manière significative, au cours de la période d'étude sur tous les sites, avec une pente de 0,02 km² par an (Tableau 3, Figures 4, 5, 6, 7, 8, 9a). Il existe une relation positive entre l'indice de sécheresse paléo climatique (PDSI) et la surface d'eau, avec une pente de 0,94 par an (Figure 9c). Fait intéressant, les précipitations ne sont pas significativement associées à la surface de l'eau (Figure 9b), probablement parce que le PDSI capture déjà l'équilibre

hydrique à long terme, ce qui en fait un meilleur prédicteur hydrologique que les précipitations brutes (Tableau 3, Figures 4b et 4c).

Tableau 5 Changement temporel de l'eau de surface en relation avec le climat

	Estimation	SE	t value	p value
(Intercept)	-36.66500	117.53270	-0.312	0.755398
Année	0.02121	0.05889	0.360	0.719144
Pr	-0.02077	0.04326	-0.480	0.631644
PDSI	0.94219	0.26733	3.524	0.000525 ***

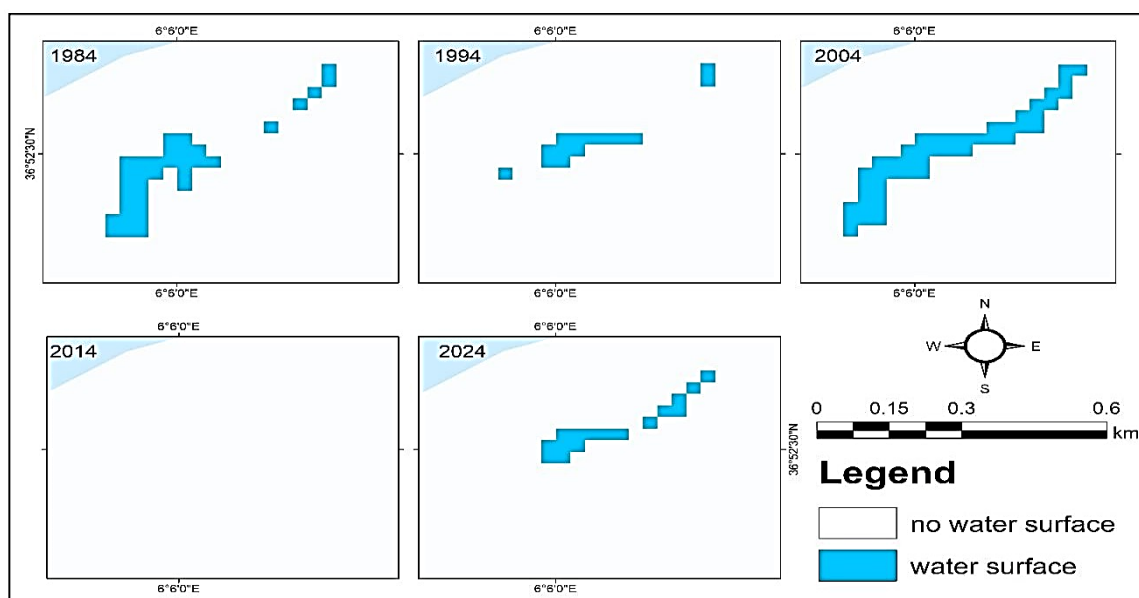


Figure 5 Changement temporel de la surface d'eau de la zone humide de Beni Belaid de 1984 à 2024.

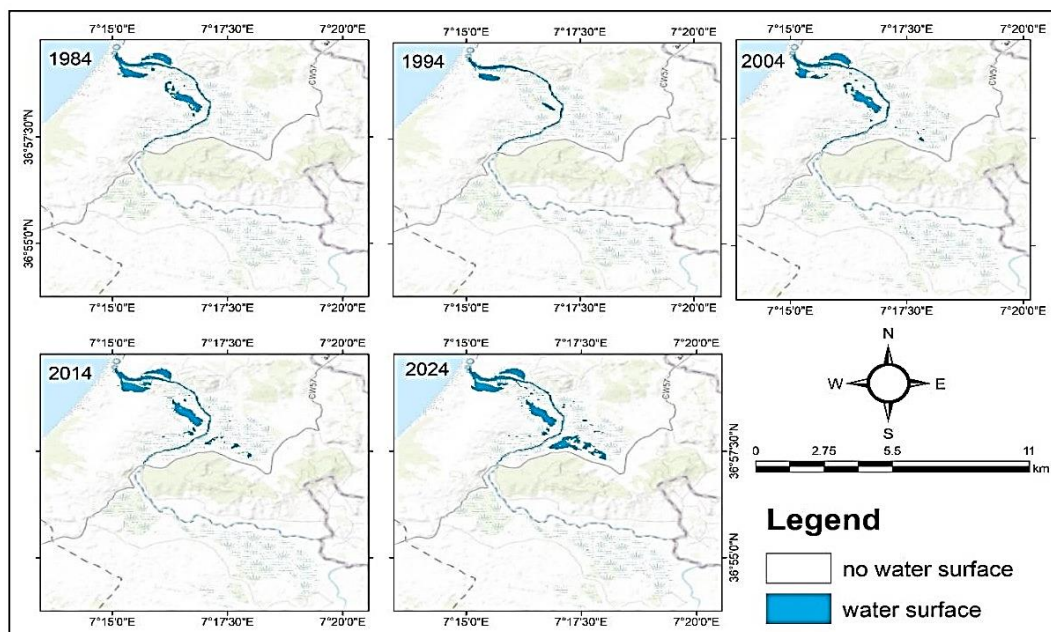


Figure 6 . Évolution temporelle de la surface d'eau de la zone humide de Guerbes Sanhadja de 1984 à 2024.

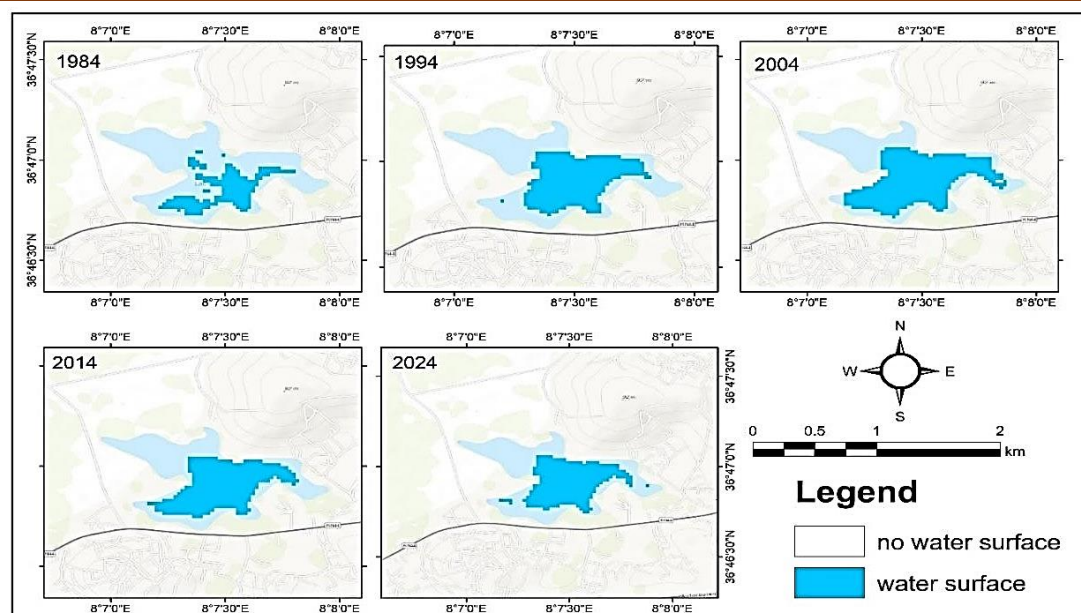


Figure 8 Évolution temporelle de la surface d'eau du lac des Oiseaux de 1984 à 2024.

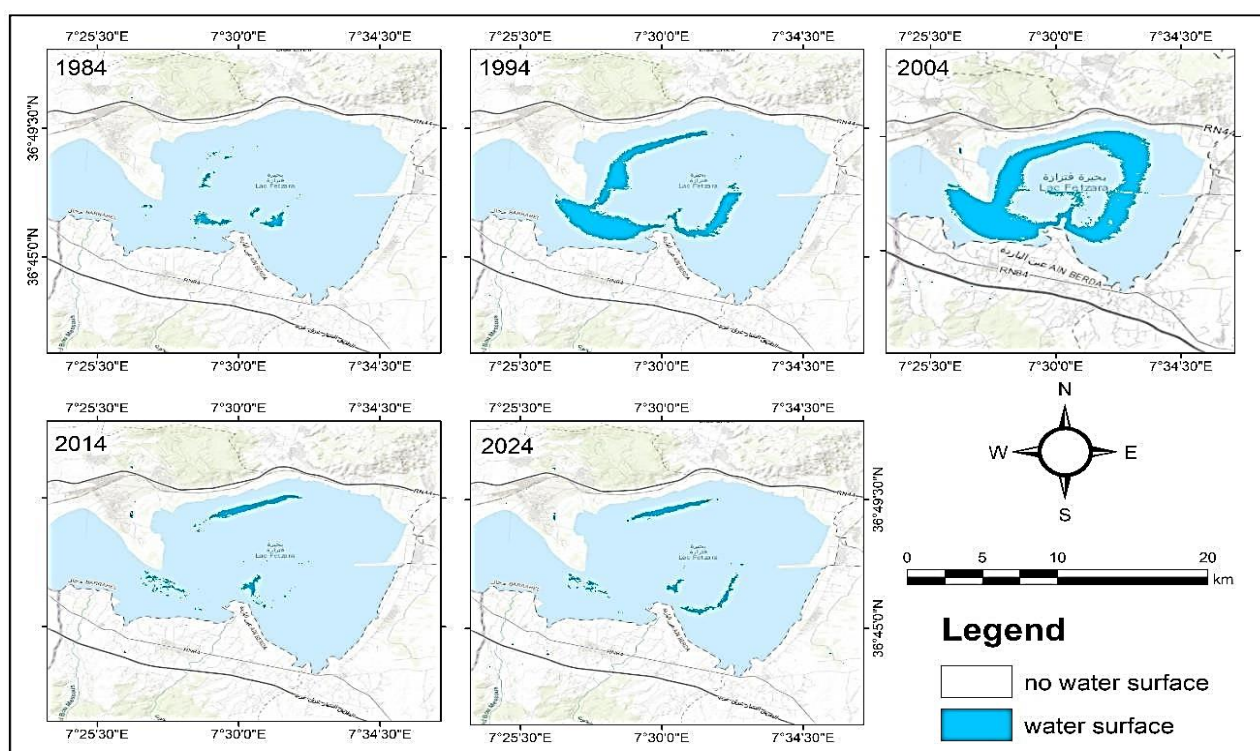


Figure 7 Évolution temporelle de la surface d'eau du lac Fetzara de 1984 à 2024.

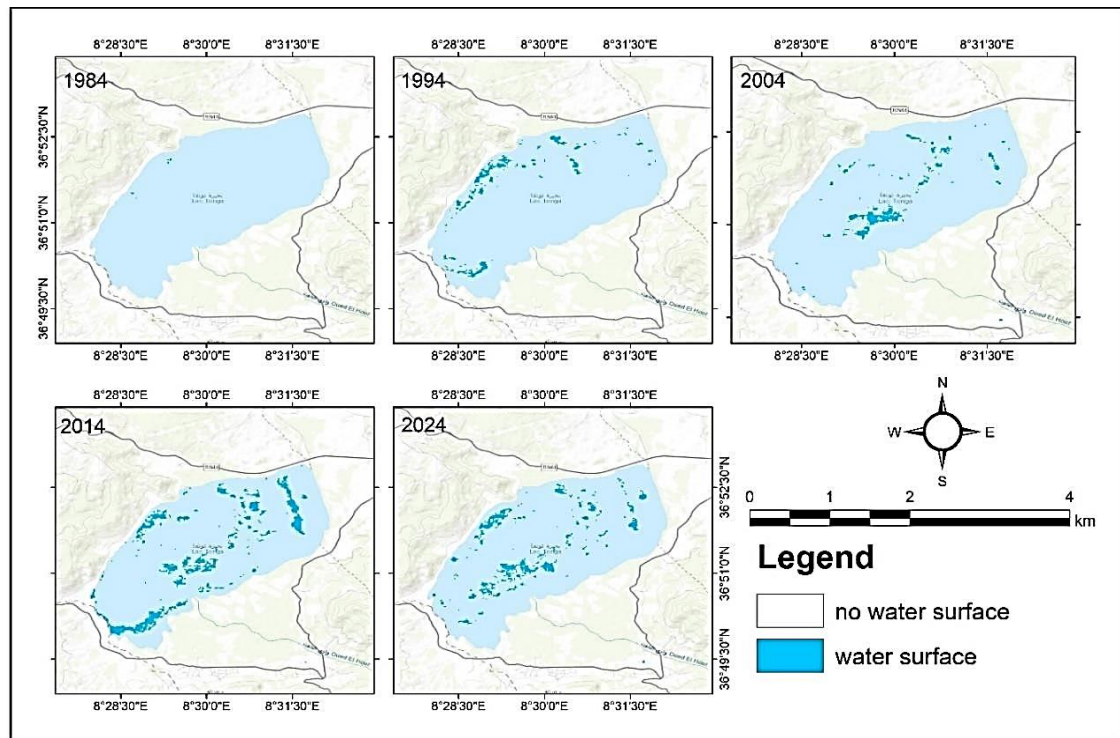


Figure 9 Évolution temporelle de la surface d'eau du lac Tonga de 1984 à 2024.

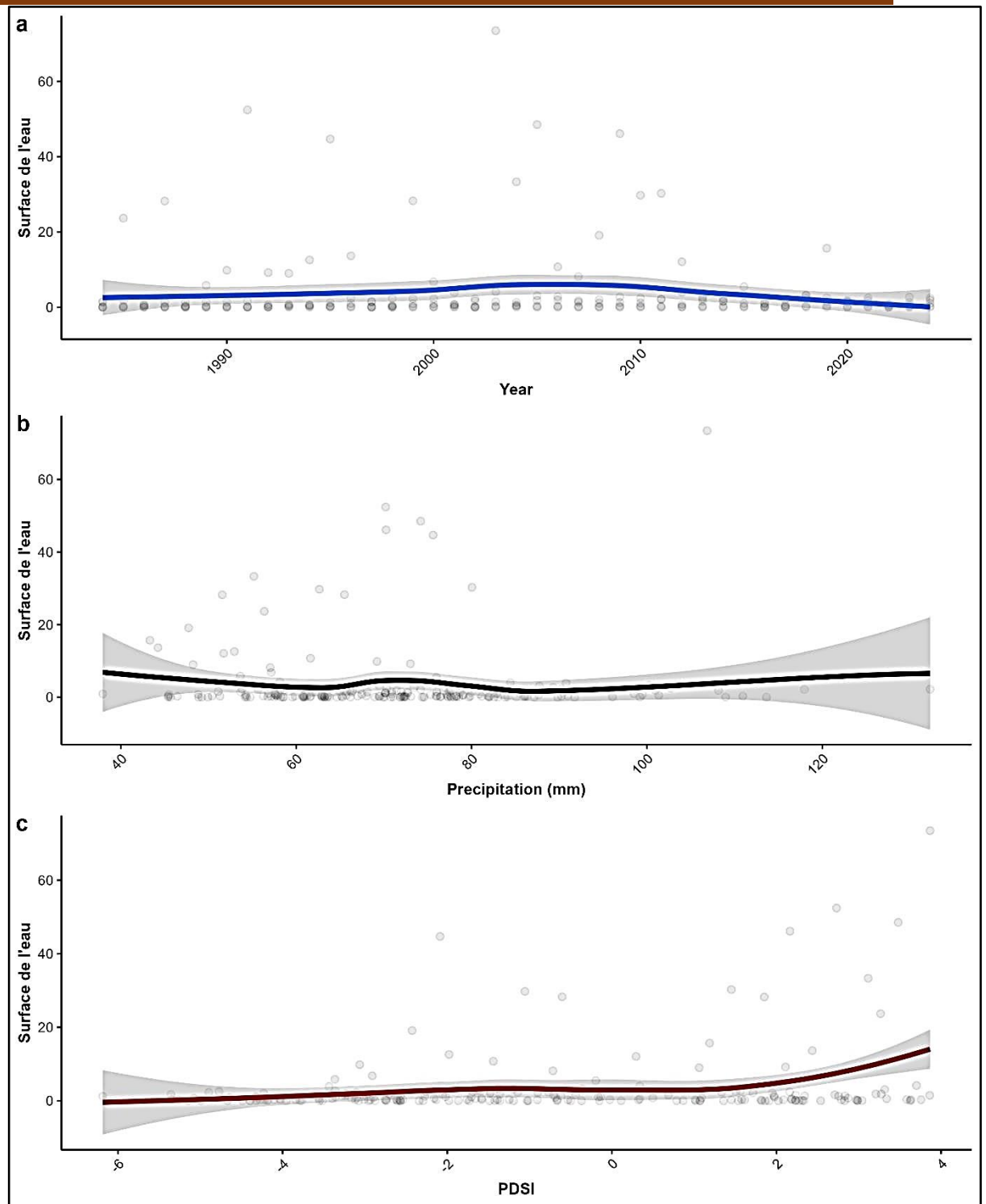


Figure 10 Évolution temporelle de la surface d'eau des zones humides (a), effet des précipitations (b) et indice PDSI sur la surface d'eau des sites d'étude.

4. Relations entre l'indice de qualité de l'eau et les variables climatiques.

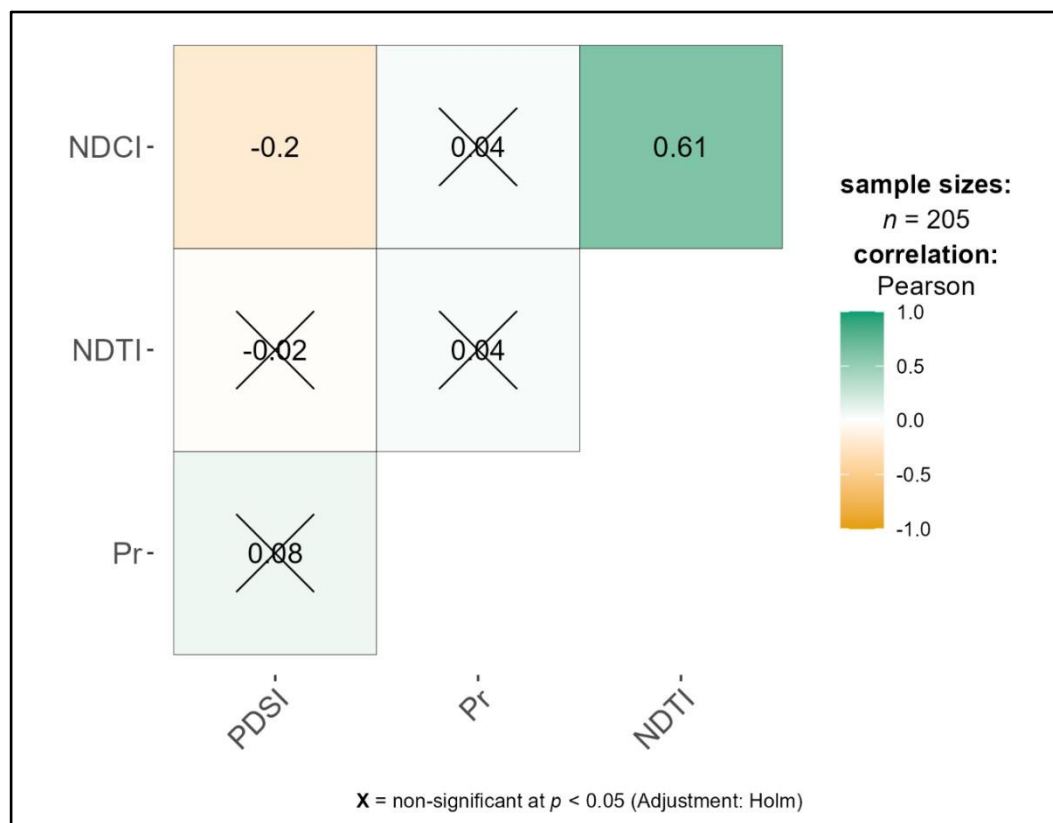
L'analyse de corrélation de Pearson a révélé plusieurs relations importantes parmi les variables environnementales évaluées (Tableau 4, Figure 10). Aucune corrélation significative n'a été observée entre l'indice de sécheresse à long terme (PDSI) et les précipitations ($r = 0,08$, $p = 0,989$), ce qui suggère que l'indice PDSI n'est pas directement influencé par les événements de précipitations à court terme, mais reflète plutôt des conditions hydrologiques plus larges. De même, aucune relation significative n'a été trouvée entre le PDSI et l'Indice de Turbidité Différentiel Normalisé (NDTI) ($r = -0,02$, $p > 0,999$), ni entre les précipitations et le NDTI ou l'Indice de Chlorophylle Différentiel Normalisé (NDCI), indiquant que les concentrations de turbidité et de chlorophylle ne sont pas directement influencées par les schémas de précipitations dans le contexte de l'étude.

Cependant, une corrélation négative significative a été détectée entre le PDSI et le NDCI ($r = -0,20$, $p = 0,022$), suggérant que des conditions plus sèches (valeurs PDSI plus faibles) sont associées à des concentrations accrues de chlorophylle. Cela pourrait refléter une croissance algale accrue dans des conditions de sécheresse, potentiellement due à la stagnation de l'eau et à la concentration de nutriments à mesure que les niveaux d'eau diminuent. Notamment, la corrélation la plus forte a été observée entre le NDTI et le NDCI ($r = 0,61$, $p < 0,001$), indiquant une relation positive forte et significative entre la turbidité et la teneur en chlorophylle. Cela implique que les efflorescences algales pourraient être un moteur majeur de la turbidité dans ces systèmes aquatiques, car des concentrations plus élevées de chlorophylle coïncident souvent avec une augmentation de la matière organique en suspension.

Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent que les paramètres de qualité de l'eau tels que la chlorophylle et la turbidité sont plus étroitement liés aux conditions de sécheresse qu'aux précipitations, et qu'ils sont également interconnectés, reflétant possiblement des facteurs communs tels que l'enrichissement en nutriments et la réduction du drainage pendant les périodes sèches.

Tableau 6 . Matrice de corrélation de Pearson entre l'indice de qualité de l'eau et les variables climatiques.

Paramètre1	Paramètre2	<i>r</i>	95% <i>CI</i>	<i>t</i>	<i>p value</i>
PDSI	Pr	0.08	[-0.06, 0.22]	1.16	0.989
PDSI	NDTI	-0.02	[-0.16, 0.12]	-0.31	> .999
PDSI	NDCI	-0.20	[-0.33, -0.06]	-2.89	0.022*
Pr	NDTI	0.04	[-0.10, 0.18]	0.58	> .999
Pr	NDCI	0.04	[-0.09, 0.18]	0.61	> .999
NDTI	NDCI	0.61	[0.52, 0.69]	11.03	< .001***

**Figure 11** Matrice de corrélation de Pearson montrant les interrelations entre le NDCI, le NDTI, le PDSI et les précipitations des sites humides étudiés.

Chapitre 3 :
Discussion générale

Discussion générale

Le changement climatique constitue une menace majeure pour les zones humides, où les épisodes de sécheresse extrême compromettent la stabilité des écosystèmes et engendrent des crises écologiques majeures.

L'analyse spatiotemporelle des changements climatiques sur une période de 30 ans dans le nord-est algérien, en particulier autour des lacs Beni Belaïd, Fetzara, Tonga et des Oiseaux, a permis de dégager des informations essentielles sur l'évolution des températures et des précipitations. Les valeurs de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), oscillant entre 0,22 et 0,32, traduisent une couverture végétale modérée à faible, avec une tendance positive significative de 0,00266 par an. Il est intéressant de noter que les lacs Beni Belaïd et Fetzara présentent des valeurs de NDVI inférieures à celles observées dans la région de Guerbes-Sanhadja. Cette différence spatiotemporelle du NDVI suggère que les zones soumises à une pression socio-économique intense affichent une végétation plus clairsemée, ce qui corrobore les résultats d'études antérieures (GUERAIDIA *et al.*, 2024)

Par ailleurs, une étude menée sur le delta du Mississippi souligne que l'augmentation des températures et les variations des précipitations impactent négativement la biodiversité et dégradent les habitats. À l'inverse, les zones protégées se distinguent par des valeurs de NDVI plus élevées, soulignant l'importance de la conservation des espaces naturels [7 La combinaison de l'activité humaine — notamment l'agriculture intensive et l'urbanisation — avec des températures élevées peut générer un stress hydrique et réduire la couverture végétale, affectant directement le NDVI. En revanche, des précipitations adéquates favorisent la croissance de la végétation. Cette étude met en évidence la complexité et la multi dimensionnalité de la relation entre l'indice NDVI et les dynamiques socio-économiques (FARAH,2023).

Concernant l'évolution de la sécheresse, les résultats de l'indice PDSI (Palmer Drought Severity Index) montrent une diminution annuelle moyenne de -4,4, traduisant une aggravation progressive de la sécheresse dans toutes les zones étudiées. Des disparités notables sont observées entre Guerbes-Sanhadja, Fetzara et Tonga, indiquant que certaines zones sont plus vulnérables que d'autres, en raison de facteurs géographiques, climatiques ou anthropiques spécifiques. L'étude de Medejerab et Henia (2011) corrobore cette observation en soulignant l'impact significatif de la sécheresse dans les régions telliennes et côtières de l'Algérie, où l'agriculture repose largement sur les précipitations. Dans le nord-

ouest algérien, les sécheresses fréquentes affectent gravement les populations et l'environnement, y compris dans des zones généralement bien arrosées.

De plus, le changement climatique influence fortement les variables hydrométéorologiques associées à la sécheresse, telles que les précipitations, l'humidité du sol et le débit des cours d'eau. Ces facteurs modifient les caractéristiques de la sécheresse — notamment sa durée, son intensité et sa fréquence — et peuvent être modélisés par des approches probabilistes (PGM) pour estimer leur propagation (Jehanzaib et Kim, 2020).

L'analyse des indices de qualité de l'eau (NDTI et NDCI) révèle que le NDTI a diminué significativement au fil du temps, indiquant une baisse de la turbidité. Les lacs Tonga et Fetzara présentent une turbidité plus faible que les autres sites, suggérant une amélioration de la qualité de l'eau dans ces zones humides. Ces résultats contrastent avec ceux rapportés par Loucif (2020), qui avait mis en évidence une forte pollution du lac Tonga, notamment par la présence de bactéries corrélées à des paramètres physico-chimiques tels que le pH, les matières en suspension (SSM), la conductivité, la turbidité et les phosphates. Ce lac était fortement eutrophisé, ce qui menaçait sa survie sans intervention.

Le lac Guerbes présente une eau plus claire, probablement en raison de son éloignement des zones urbaines et de l'agriculture intensive, ce qui limite l'apport en sédiments et en polluants. Ce constat rejoint les conclusions de Boudraa (2016), qui a démontré que les zones humides urbaines et périurbaines subissent une pollution intense. Par exemple, le marais de Boussedra est principalement alimenté par les eaux usées d'El-Bouni, ce qui enrichit le milieu en sels minéraux et oligoéléments. La géologie et la topographie locales influencent également la turbidité.

Concernant le lac des Oiseaux, des zones sensibles à l'eutrophisation ont été identifiées. L'accumulation excessive de nutriments, notamment due à l'agriculture intensive, aux rejets d'eaux usées non traitées et aux déchets issus de l'élevage, favorise la prolifération algale et dégrade la qualité de l'eau. Ces observations concordent avec l'étude de Toumi *et al.*, (2016)

qui soulignent un risque élevé de dégradation écologique dans cette zone humide.

L'analyse des corrélations entre les indices de qualité de l'eau et les variables climatiques montre qu'il n'existe pas de relation significative entre le PDSI et les précipitations, ni entre les précipitations et les indices NDTI ou NDCI. Cela suggère que les précipitations à court terme n'influencent pas directement la qualité de l'eau. En revanche, une corrélation

Discussion générale

négative significative entre le PDSI et le NDCI indique que des conditions plus sèches sont associées à une concentration accrue de chlorophylle, probablement en raison de la stagnation de l'eau et de l'accumulation des nutriments. De plus, une forte corrélation entre le NDTI et le NDCI ($r = 0,61$) révèle que la turbidité est étroitement liée à la teneur en chlorophylle, ce qui est typique des phénomènes d'efflorescence algale.

En somme, la sécheresse, exacerbée par le changement climatique, constitue une menace croissante pour les zones humides du nord-est algérien, notamment les lacs Beni Belaïd, Fetzara, Tonga et des Oiseaux. L'analyse sur trois décennies met en évidence une intensification de ce phénomène, avec des répercussions notables sur la biodiversité et la qualité des écosystèmes. Les variations climatiques et les pressions anthropiques, telles que l'agriculture intensive et l'urbanisation, accentuent le stress hydrique, nécessitant des stratégies de gestion intégrée et de conservation pour préserver ces milieux sensibles.

Conclusion et perspectives

Conclusion

Les zones humides du Nord-Est de l'Algérie, classées sites Ramsar et riches en biodiversité, sont menacées par le surpâturage, l'agriculture illégale, ainsi que la chasse et la pêche non réglementées. Ces écosystèmes sont essentiels pour contrôler les inondations, recharger les aquifères, piéger les substances toxiques et recycler les nutriments, tout en fournissant des habitats pour une flore et une faune variée. Les milieux humides méditerranéens, en particulier, sont en déclin rapide (Bouldjedri *et al.*, 2011) .

Cette étude a pour objectif d'explorer de la sécheresse sur les zones humides Lentiques du nord-est algérien en se concentrant sur quatre objectifs : étudier le modèle Spatiotemporel de la végétation et les variations climatiques, évaluer les changements de qualité des eaux à l'aide des indices NDTI et NDCI, examiner l'effet du changement climatique sur la superficie des plans d'eau, et analyser la relation entre la qualité des eaux et les facteurs climatiques.

L'analyse des changements climatiques sur 30 ans dans le nord-est algérien, autour des lacs Beni Balaed, Fetraza, Tonga et des Oiseaux, révèle des tendances importantes concernant les températures et les précipitations. Le NDVI, variant entre 0,22 et 0,32, indique une végétation modérée à faible, avec une augmentation significative de 0,00266 par an. Les lacs Beni Balaed et Fetraza affichent des valeurs de NDVI inférieures à celles de Guerbes-Sanhadja, suggérant qu'une forte activité socio-économique est associée à un NDVI plus faible. De plus, une étude sur le delta du Mississippi souligne que l'augmentation des températures et les variations des précipitations nuisent à la biodiversité.

L'indice PDSI a révélé une diminution annuelle de 4,4, indiquant une intensification de la sécheresse dans toutes les zones étudiées, notamment Guerbes-Sanhadja, Ferzara et Tonga, avec des impacts négatifs sur l'agriculture et l'approvisionnement en eau. Des différences notables entre ces régions suggèrent que certaines sont plus affectées, possiblement en raison de facteurs géographiques, climatiques ou humains.

L'analyse de l'indice de qualité de l'eau révèle une diminution significative de la turbidité au fil du temps. Les lacs Tonga et Fetraza montrent une amélioration par rapport à 2020, bien que le lac Tonga demeure eutrophisé et nécessite des protections. En revanche, le Lac Guerbes présente une eau plus claire, probablement grâce à son éloignement des zones urbaines et agricoles, limitant ainsi l'apport de polluants.

Conclusion

En conclusion, Cette étude souligne l'importance des zones humides du nord-est de l'Algérie, classées sites Ramsar, pour la régulation des écosystèmes et la biodiversité. Cependant, elles sont menacées par le surpâturage, l'agriculture illégale et la pêche non réglementée. Une analyse sur 30 ans révèle une intensification de la sécheresse, impactant la végétation et la qualité de l'eau, notamment autour des lacs Beni Balaed, Fetraza, Tonga et des Oiseaux. Bien que le lac Guerbes montre une amélioration de la qualité de l'eau, le lac Tonga demeure vulnérable à l'eutrophisation.

Pour l'avenir,

- ✓ Il est essentiel de développer des stratégies de gestion durable afin de protéger les écosystèmes fragiles et de soutenir les communautés locales.
- ✓ La sensibilisation et l'action collective sont nécessaires pour atténuer les effets de la sécheresse et préserver la richesse naturelle de la région.
- ✓ Cela inclut la régulation des activités humaines, l'éducation des communautés sur l'importance des zones humides, et le renforcement de la surveillance et de la recherche.
- ✓ Des initiatives de restauration écologique devraient également être envisagées pour améliorer la résilience des milieux humides face au changement climatique, garantissant ainsi la préservation de ces habitats pour les générations futures.

Bibliographies

Références Bibliographiques :

- Mellouk, K., & Aroua, N. (2015). Le lac Fetzara, une zone humide fragile, menacée par l'extension urbaine de la ville d'Annaba (littoral est algérien). *Méditerranée. Revue géographique des pays méditerranéens/Journal of Mediterranean geography*(125), 133-140.
- Razkallah Zahra, Z. A. (2013). Etude de la qualité bactériologique des eaux de quelques zones humides du complexe de Guerbes-Sanhadja (Wilaya de Skikda).
- Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental science and pollution research*, 29(28), 42539-42559.
- Ahidur, R. (2016). Impact of human activities on wetland: a case study from Bongaigaon District, Assam, India. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences ISSN*, 2319-7706.
- Azonningbo, S. H. W., Adjakpa, J. B., & Agbangba, E. C. (2021). Organisation spatio-temporelle des peuplements d'oiseaux de la zone humide d'importance internationale du Sud-Ouest du Bénin (Site Ramsar 1017). *International Journal of Environmental Studies*, 78(1), 117-139.
- Batzer, D. P., & Wu, H. (2020). Ecology of terrestrial arthropods in freshwater wetlands. *Annual Review of Entomology*, 65(1), 101-119.
- Beven*, K. (2001). How far can we go in distributed hydrological modelling? *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1), 1-12.
- Boudraa, W. (2016). *Contribution à l'étude écologique de l'avifaune aquatique d'une zone humide périurbaine: cas du marais de Boussedra (Nord-est de l'Algérie)*. Thèse Doctorat. Université BADJI MOKHTAR. Annaba. Pp: 05-122.
- Bouldjedri, M., de Bélair, G., Mayache, B., & Muller, S. D. (2011). Menaces et conservation des zones humides d'Afrique du Nord: le cas du site Ramsar de Beni-Belaid (NE algérien). *Comptes rendus biologies*, 334(10), 757-772.
- Boulkhssaim, M., Ouldjaoui, A., & Boulahbel, S. (2016). ECOLOGIE DE LA REPRODUCTION DU TADORNE DE BELON Tadorna tadorna DANS LA REGION DES ZONES HUMIDES D'OUM EL BOUAGHI.
- C.Amy, A. S. (2014). 3. La gouvernance du changement climatique. Anatomie d'un schisme de réalité. doi: 10.3917/dec.pest.2014.01.0097
- Cheng, M., McCarl, B., & Fei, C. (2022). Climate Change and Livestock Production: A Literature Review. *Atmosphere*, 13(1), 140.
- Das, A., & Basu, T. (2020). Assessment of peri-urban wetland ecological degradation through importance-performance analysis (IPA): A study on Chatra Wetland, India. *Ecological Indicators*, 114, 106274.
- Davidson, N. C., Fluet-Chouinard, E., & Finlayson, C. M. (2018). Global extent and distribution of wetlands: trends and issues. *Marine and Freshwater Research*, 69(4), 620-627.
- Duran, C. (2023). *Une vision holistique des assemblages de communautés benthiques ouvre la voie à la définition de bioindicateurs moléculaires de l'état écologique des marais*. Pau.

Référence

- Erwin, K. L. (2009). Wetlands and global climate change: the role of wetland restoration in a changing world. *Wetlands Ecology and management*, 17(1), 71-84.
- FARAH, T. (2023). *Impact du changement climatique sur les écosystèmes agricoles et forestiers des Monts des Traras à l'aide des techniques de la géomatique-Algérie nord occidentale*. Université Abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem.
- Faruque, M. J., Vekerdy, Z., Hasan, M. Y., Islam, K. Z., Young, B., Ahmed, M. T., . . . Kundu, P. (2022). Monitoring of land use and land cover changes by using remote sensing and GIS techniques at human-induced mangrove forests areas in Bangladesh. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 25, 100699.
- Gardner, R. C., & Finlayson, C. (2018). *Global wetland outlook: state of the world's wetlands and their services to people*. Paper presented at the Ramsar convention secretariat.
- Grill, G., Lehner, B., Lumsdon, A. E., MacDonald, G. K., Zarfl, C., & Liermann, C. R. (2015). An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales. *Environmental Research Letters*, 10(1), 015001.
- GUERAIDIA, N. E. H., GUERAIDIA, S., SIRINE, R. R., FEHDI, C., & ABD EL KADER, H. (2024).
-). Natural hazard processing analyze investigation using different spectral indices (ndvi, ndwi, mdwi, savi, ndbi, nbr) case study of souk ahras area north-est of algeria.
- Hassan, W. H., Khazaal, S. T., & Al-Shammari, M. H. (2024). Effect of Climate Change on Wetland Areas in West Iraq Using Satellite Data and GIS Techniques. *Civil Engineering Journal*, 10(9), 2966-2978.
- Hickey, A., Arnscheidt, J., Joyce, E., O'Toole, J., Galvin, G., O'Callaghan, M., . . . Hughes, F. (2018). An assessment of the performance of municipal constructed wetlands in Ireland. *Journal of Environmental Management*, 210, 263-272.
- Homci, I., & Hamidani, S. (2019). Analyse De La Biodiversité De L'avifaune Aquatique Du Lac Ayata Entre 2013 Et 2018.
- Jehanzaib, M., & Kim, T.-W. (2020). Exploring the influence of climate change-induced drought propagation on wetlands. *Ecological Engineering*, 149, 105799.
- Karamidehkordi, E., Karimi, V., Hallaj, Z., Karimi, M., & Naderi, L. (2024). Adaptable leadership for arid/semi-arid wetlands conservation under climate change: Using analytical hierarchy process (AHP) approach. *Journal of Environmental Management*, 351, 119860.
- Keita, Z. (2024). *L'impact du réchauffement climatique sur l'homme, la faune et la flore dans les 10 dernières années: Revue de la littérature*. USTTB.
- Khadoumi, A., Bouzekri, M. A., & Guerzou, A. (2022). Species diversity of myrmecofauna (Hymenoptera: Formicidae) in Zehrez Chergui's Wetland, Djelfa, Algeria: First checklist. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 15(4), 551-556.
- Kingsford, R. T., Bino, G., Finlayson, C. M., Falster, D., Fitzsimons, J. A., Gawlik, D. E., . . . Regan, T. (2021). Ramsar wetlands of international importance—improving conservation outcomes. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 643367.

Référence

- Li, H., Li, T., Sun, W., Zhang, W., Zhang, Q., Yu, L., . . . Zha, X. (2021). Degradation of wetlands on the Qinghai-Tibetan Plateau causing a loss in soil organic carbon in 1966–2016. *Plant and Soil*, 467, 253-265.
- LOUASSA, S., ALIAT, T., BOUDIAF, Y., & BENDJEDDOU, F. (1983). Valeur ornithologique d'une zone humide périurbaine des hautes plaines de l'est algérien, la zone humide El Hammam wilaya Bordj Bou Arreridj.
- Loucif, K. (2020). *Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau du lac Tonga (wilaya d'El Tarf) et occupation spatio-temporelle du site par l'avifaune aquatique*. Mohamed-Cherif Messaadia University-Souk Ahras.
- Mars, N., Maouni, A., & Saïdi, R. (2023). *Importance des zones humides urbanisées dans la reproduction de l'avifaune, ville de Martil (Région de Tétouan) au Maroc*. Paper presented at the SHS Web of Conferences.
- Medejerab, A., & Henia, L. (2011). Variations spatio-temporelles de la sécheresse climatique en Algérie nord-occidentale.
- Mellouk, K., & Aroua, N. (2015). Le lac Fetzara, une zone humide fragile, menacée par l'extension urbaine de la ville d'Annaba (littoral est algérien). *Méditerranée. Revue géographique des pays méditerranéens/Journal of Mediterranean geography*(125), 133-140.
- Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418-422.
- Pickens, A. H., Hansen, M. C., Hancher, M., Stehman, S. V., Tyukavina, A., Potapov, P., . . . Sherani, Z. (2020). Mapping and sampling to characterize global inland water dynamics from 1999 to 2018 with full Landsat time-series. *Remote Sensing of Environment*, 243, 111792.
- Ramsar, M. (2016). *introduction à la convention sur les zones humides*. Paper presented at the Secrétariat de la Convention de Ramsar, Gland, Suisse.
- Razkallah Zahra, Z. A. (2013). Etude de la qualité bactériologique des eaux de quelques zones humides du complexe de Guerbes-Sanhadja (Wilaya de Skikda).
- Rial, J. A., Pielke, R. A., Beniston, M., Claussen, M., Canadell, J., Cox, P., . . . Reynolds, J. F. (2004). Nonlinearities, feedbacks and critical thresholds within the Earth's climate system. *Climatic change*, 65, 11-38.
- Salimi, S., Almuktar, S. A., & Scholz, M. (2021). Impact of climate change on wetland ecosystems: A critical review of experimental wetlands. *Journal of Environmental Management*, 286, 112160.
- Schroeder, R., McDonald, K. C., Chapman, B. D., Jensen, K., Podest, E., Tessler, Z. D., . . . Zimmermann, R. (2015). Development and evaluation of a multi-year fractional surface water data set derived from active/passive microwave remote sensing data. *Remote Sensing*, 7(12), 16688-16732.
- Shafi, A., Chen, S., Waleed, M., & Sajjad, M. (2023). Leveraging machine learning and remote sensing to monitor long-term spatial-temporal wetland changes: Towards a national RAMSAR inventory in Pakistan. *Applied Geography*, 151, 102868.
- Toumi, A., Reggam, A., Alayat, H., & Houhamdi, M. (2016)

Référence

-). Caractérisation physico-chimique des eaux de l'écosystème lacustre: cas du Lac des Oiseaux (Extrême NE-Algérien) Physico-chemical characterization of waters of the lake ecosystem: Case of Lake of Birds (Far NE-Algerian).
- Wu, Q. (2017). GIS and remote sensing applications in wetland mapping and monitoring. *Preprints*.
- Xie, C., Zeng, Y., Hao, X., Ning, Z., & Xie, T. (2024). Asymmetric impacts of natural and anthropogenic factors on wetland landscape evolution in Fenhe River Basin, China. *Watershed Ecology and the Environment*, 6, 176-186.
- Xiong, Y., Mo, S., Wu, H., Qu, X., Liu, Y., & Zhou, L. (2023). Influence of human activities and climate change on wetland landscape pattern—A review. *Science of the total Environment*, 879, 163112.
- Xu, D., Bisht, G., Tan, Z., Sinha, E., Di Vittorio, A. V., Zhou, T., . . . Leung, L. R. (2024). Climate change will reduce North American inland wetland areas and disrupt their seasonal regimes. *Nature communications*, 15(1), 2438.
- Xu, T., Weng, B., Yan, D., Wang, K., Li, X., Bi, W., . . . Liu, Y. (2019). Wetlands of international importance: Status, threats, and future protection. *International journal of environmental research and public health*, 16(10), 1818.
- Zhang, X., Zhong, Z., Zhang, M., Zhao, F., Wu, Y., Sun, Y., . . . Cai, J. (2025). Analysis of anthropogenic disturbance and spatial and temporal changes of bird communities in plateau wetlands fusing bird survey and nighttime light remote sensing data. *Journal of Environmental Management*, 375, 124349.

Webographie

- [1] <https://rsis Ramsar.org/fr/ris/1056>
- [2]. https://rsis Ramsar.org/RISapp/files/46441488/pictures/DZ1303_map1602.pdf.
- [3]. <https://rsis Ramsar.org/fr/ris/281>.
- [4]. https://rsis Ramsar.org/RISapp/files/RISrep/DZ975RIS_1905_fr.pdf.
- [5]. https://rsis Ramsar.org/RISapp/files/RISrep/DZ1303RIS_1803_fr.pdf.
<https://oceansconnectes.org/la-disparition-silencieuse-des-marais-du-mississippi/>
- [6]. <https://rsis Ramsar.org/fr/ris/1303>.