



Impact de la variabilité climatique sur les oiseaux (Pélican blanc, Flamant rose et Dendrocygne veuf) dans le Parc National des Oiseaux du Djoudj

Mallé GUEYE¹, Fouleymatou DIAOUNE¹, Moustapha SY², Ibrahima GUEYE³

¹Département HydroSciences et Environnement, Université Iba Der Thiam de Thiès, Sénégal

²Institut Supérieur de Formation Agricole et Rural, Université Alioune Diop de Bambey, Sénégal

³Direction des Parcs Nationaux, Dakar-Fann, BP 5135, Dakar, Sénégal

Correspondant principal : mallegueye@yahoo.fr & malle.gueye@univ-thies.sn

Keywords: Climate variability, Waterbirds, Djoudj National Bird Park, SPEI, TRIM, GAM.

Mots clés : Variabilité climatique, Oiseaux d'eau, Parc national, SPEI, TRIM, GAM.

Submitted 03/10/2025, Published online on 31st December 2025 in the *Journal of Animal and Plant Sciences (J. Anim. Plant Sci.)* ISSN 2071 – 7024

1 RESUME

Les changements du climat observés dans le PNOD présentent une menace relativement faible pour les populations d'oiseaux d'eau. Dans cette étude, l'indice standardisé de précipitation et d'évapotranspiration (SPEI) a été utilisée pour caractériser la variabilité du climat dans le parc. Cet indice a été déterminé à partir des données de précipitation et de température sur la période de 1989 à 2020. Le test de Mann-Kendall et la pente de Theil-Sen ont permis de déterminer la tendance et l'ampleur de l'évolution de la température, de la pluviométrie et de la sécheresse. Les résultats indiquent que le parc a subi des variations de températures estimées à 0,02°C/an soit une augmentation de 0,62°C sur la période d'étude alors que la pluviométrie augmente de 0,22 mm/an soit une hausse globale de 6,82 mm. L'indice SPEI indique une tendance à la sécheresse à toutes les échelles temporelles. L'évolution des populations d'oiseaux d'eau a été déterminée avec la méthode TRIM. Celle-ci révèle une hausse annuelle significative de 2,6% pour le flamant rose, 2,7% pour le pélican blanc et 4,6% pour le dendrocygne veuf. Ces trois espèces augmentent annuellement de façon modérée à l'intervalle de confiance de 95%. L'analyse de la pluviométrie, de la température et du SPEI sur les populations d'oiseaux via les modèles additifs généralisés montrent que ces trois variables n'expliquent pas l'abondance de ces espèces dans le PNOD. Ceci s'explique par l'homéothermie de ces oiseaux. Ces derniers ont une capacité de régulation thermique qui leur permet de s'adapter aux conditions défavorables. Leur présence dans le parc n'est également pas conditionnée par la pluviométrie, car le parc dispose d'un système hydraulique lui permettant de recevoir une quantité suffisante d'eau à partir du fleuve Sénégal. Parmi ces espèces, seul le flamant rose a réagi aux périodes de sécheresse et d'humidité prolongées et reste le plus vulnérable face aux changements climatiques dans le PNOD.

ABSTRACT

The climate changes observed in the Djoudj National Bird Sanctuary (PNOD) represent a relatively low threat to waterbird populations. In this study, the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) was used to characterize climate variability in the park. This index was calculated from precipitation and temperature data covering the period from 1989 to 2020. The Mann-Kendall test and the Theil-Sen slope were applied to determine the trend and the magnitude of changes in temperature, rainfall, and drought. The results indicate that the park experienced temperature variations estimated at 0.02°C per year, corresponding to an overall increase of 0.62°C during the study period, while



rainfall increased by 0.22 mm per year, equivalent to a total rise of 6.82 mm. The population trends of waterbirds were assessed using the TRIM method. The results reveal a significant annual increase of 2.6% for the Greater Flamingo, 2.7% for the Great White Pelican, and 4.6% for the White-faced Whistling Duck. These three species show a moderate annual increase within the 95% confidence interval. The analysis of rainfall, temperature and SPEI effects on bird populations through Generalized Additive Models showed that these three variables do not explain the abundance of these species in the PNOD. This is explained by their homeothermy, which allows them to regulate body temperature and adapt to unfavorable conditions. Their presence in the park is also not dependent on rainfall, as the site benefits from a hydraulic system that channels sufficient water from the Senegal River. Among these species, only the Greater Flamingo reacts to prolonged drought and humidity, making it the most vulnerable to climate change within the PNOD.

2 INTRODUCTION

Le changement climatique constitue l'une des principales causes de perte de la biodiversité (IPCC, 2022). En effet, ces changements ont significativement affecté tous les niveaux d'organisations biologiques (FRB, 2006) en modifiant la structure, le fonctionnement des écosystèmes, et par conséquent les répartitions temporelles et spatiales des populations, ainsi que l'abondance des espèces (Gadenne, 2012). Chez les oiseaux d'eau, les impacts du changement climatique sont identifiés, mais leur ampleur, leur intensité et leur calendrier sont difficiles à prévoir avec exactitude en raison de la large échelle des modèles climatiques mondiaux et la connaissance limitée de l'écologie de nombreuses espèces d'oiseaux d'eau (Finlayson *et al.*, 2006). Cependant, les impacts les plus constatés incluent les pertes d'habitats intertidaux, l'augmentation de la salinité dans les habitats côtiers d'eau douce, la réduction de la surface des zones humides, la perte des habitats de reproduction et une inondation plus longue des zones arides et semi-arides résultant des changements de variabilité climatique (Finlayson *et al.*, 2006). Cette dernière bien qu'elle soit indissociable au changement climatique, il est nécessaire de distinguer ces deux notions. La variabilité climatique fait référence aux variations de l'état moyen du climat à toutes les échelles spatiales et temporelles, au-delà des événements météorologiques individuels (Ffa, 2019) alors que le changement climatique désigne des

changements qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables (CCNUCC, 1992). En Afrique de l'Ouest, la variabilité climatique se manifeste par des épisodes de sécheresses et des pluies irrégulières particulièrement dans la région du sahel (Brooks, 2004; Descroix *et al.*, 2015). Ces variations affectent les zones humides. Celles-ci étant parmi les milieux naturels les plus riches et les plus productifs au monde sont considérés comme les écosystèmes les plus sensibles et les plus instables (Holland *et al.*, 2014; Kamel, 2003) face aux changements environnementaux. Ces milieux tracent à la surface de la terre des corridors que suivent depuis des siècles les oiseaux migrateurs (Gadenne, 2012). Au Sénégal, le Parc National des Oiseaux du Djoudj (PNOD)¹ illustre un exemple emblématique de zone humide. Il accueille, chaque année, plus de trois millions d'oiseaux migrateurs (Gueye *et al.*, 2017). Ces oiseaux constituent des bioindicateurs et reflètent la santé des écosystèmes (Carrasco *et al.*, 2025; Gregory *et al.*, 2003; Gupta, 2022). Les impacts de la variabilité climatique sur les populations d'oiseaux ont été un domaine d'étude majeur pour les ornithologues au cours du demi-siècle dernier (Crick, 2004). En effet, beaucoup d'études fournissent des preuves sur l'existence de réponses écologiques au changement climatique (Root *et al.*, 2003) mais

¹ <https://www.toutvert.fr/ornithologie-infos/>



ces travaux sont particulièrement limités en Europe et en Amérique (Rosenzweig *et al.*, 2008). Par conséquent, il existe des lacunes voire une absence d'étude des effets des changements climatiques sur les oiseaux d'eau notamment ceux présents en Afrique de l'Ouest, au Sénégal plus particulièrement dans le PNOD. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude intitulée : « Impact de la variabilité climatique sur les oiseaux d'eau tels que le pélican blanc, le dendrocygne veuf, le flamant rose dans le PNOD de 1989 à 2020 ». Cette

3 MATERIEL ET METHODES

3.1 Zone d'étude : Le PNOD se situe au Nord-Ouest du Sénégal, à soixante kilomètres de la région de saint louis, dans le département de Dagana, commune de Diama et dans l'arrondissement de Ndiaye entre 16°30 de latitude nord et 16°10 de longitude ouest. Il est limité à l'ouest et au nord par la digue-piste périphérique longeant le fleuve Sénégal, au Sud par le marigot du Gorom et à l'est par celui du Khar (Gueye, 2023). Il a été créé en 1971 par le décret N° 71-471 du 14 avril 1971 afin de sauvegarder les populations d'oiseaux d'eau en voie de disparition ainsi que les écosystèmes du delta du fleuve Sénégal (Dia *et al.*, 2002). Le parc couvre 16000 hectares et bénéficie de plusieurs statuts, zone humide d'importance internationale en 1977 par la convention de Ramsar puis site du patrimoine mondial de

étude vise à contribuer donc à l'amélioration des connaissances concernant les effets du changement climatique sur les oiseaux d'eau. Il s'agira spécifiquement d'étudier :

- La variabilité du climat sur cet écosystème ;
- L'abondance et la tendance de ces populations d'oiseaux d'eau ;
- L'impact de la variabilité du climat sur les effectifs d'oiseaux d'eau étudiés.

l'UNESCO en 1981 (DPN, 2017). Le climat du PNOD est semi-aride de type sahélo-saharien caractérisé notamment par des précipitations annuelles faibles (généralement entre 200 à 300mm) irrégulières dans le temps et dans l'espace ainsi que par de fortes températures (DPN, 2017; Fall, 1990). Le parc est la troisième réserve ornithologique au niveau mondial². Ce statut se justifie par l'effectif total de l'avifaune estimé à plus de trois millions d'oiseaux (Gueye *et al.*, 2017) repartis en 360 espèces avec 90% d'oiseaux d'eau qui sont pour la plupart des migrateurs du paléarctique (Beintema & Vessem, 1998). Parmi ces espèces figurent le flamant rose (*Phoenicopterus roseus*), le pélican blanc (*Pelecanus onocrotalus*), le dendrocygne veuf (*Dendrocygna viduata*) entre autres.

² <https://www.toutvert.fr/ornithologie-infos>

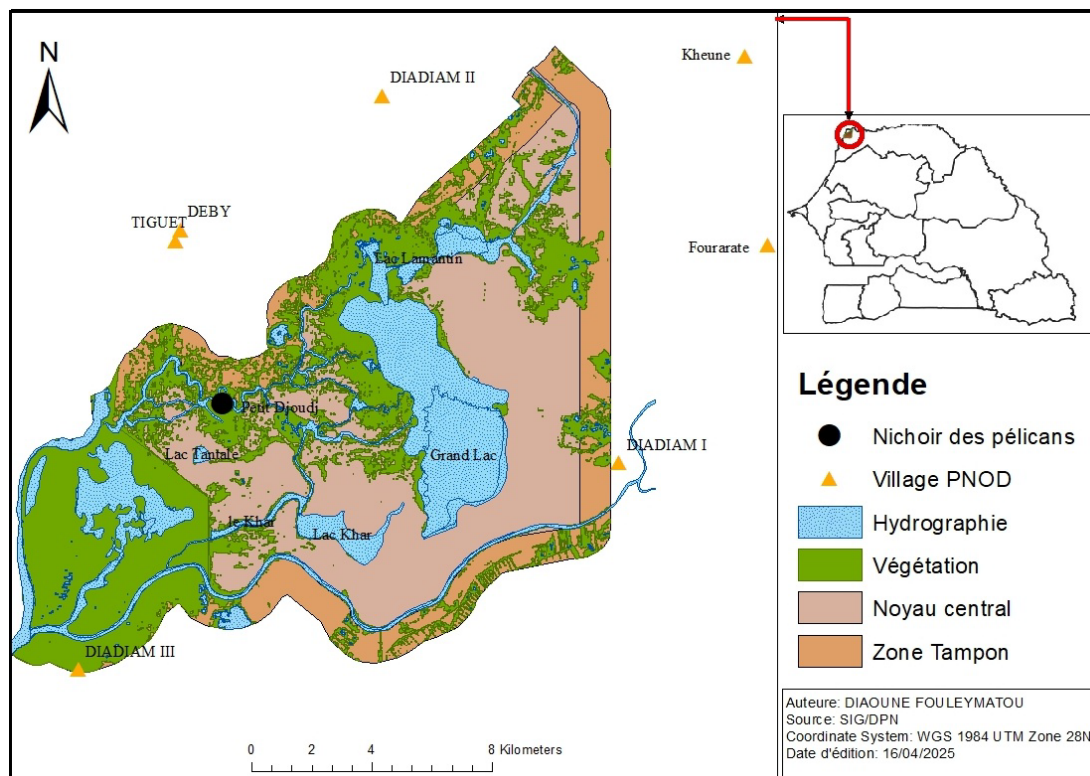


Figure 1 : Carte de localisation du Parc National des Oiseaux du Djoudj



Photo 1 : Flamants roses (*Phoenicopterus roseus*) dans le PNOD (Source : Ndiaye, 2024)



Photo 2 : Pélicans blancs (*Pelecanus onocrotalus*) dans le PNOD (Source : Ndiaye, 2023)



Photo 3 : Dendrocygnes veufs (*Dendrocygna viduata*) dans le PNOD (Source : Ndiaye, 2024)

3.2 Méthodologie :

3.2.1 Collecte de données : Deux types de données ont été collectés : les données climatiques et ornithologiques :

Données climatiques : Les données climatiques telles que la température et la

pluviométrie couvrant la période de 1989 à 2020 ont été recueillies respectivement grâce aux bases de données du National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)³ et du Centre de Climatologie des Précipitations

³ <https://www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.ghcnams.html>

mondiales (Global Precipitation Climatology Centre (GPCC))⁴.

Données ornithologiques : Les données sur les effectifs des populations de Flamant rose, Pélican blanc et Dendrocygne veuf proviennent de la base de données du PNOD. Elles couvrent la période de 1989 à 2020. Ces données ont été acquises grâce aux différents dénombrements mensuels qu'effectuent les agents le 15 de chaque mois mais également grâce au Dénombrement International des Oiseaux

3.2.2 Traitement et analyse des données

3.2.2.1 Analyse de la variabilité du climat dans le PNOD : L'étude de la variabilité climatique dans le PNOD a été réalisée à partir des données de pluviométries et de températures mensuelles couvrant la période de 1989 à 2020. Ces paramètres climatiques permettent le calcul de l'indice de précipitation et d'évapotranspiration standardisé (SPEI) développée par Vicente-Serrano *et al.* (2010). Plusieurs études portant sur les études environnementales (Abiodun *et al.*, 2012; Barbeta *et al.*, 2013; Beguería *et al.*, 1994; Deng & Chen, 2011; Drew *et al.*, 2012; Lévesque *et al.*, 2013; Potop, 2011; Sohn *et al.*, 2013; Spinoni *et al.*, 2013; Toromani *et al.*, 2011; Vicente-Serrano *et al.*, 2010, 2012; Yu *et al.*, 2013), ont adopté cet indice. Selon Baudewyn (2023), le SPEI utilise à la fois des données d'évapotranspiration potentielle et des données de précipitations, ce qui permet d'analyser les conséquences du réchauffement climatique sur le milieu et l'intensité des sécheresses atmosphériques. Il se calcule à plusieurs échelles soit un, trois, six, douze voire vingt-quatre mois. L'indice SPEI est donné par la relation suivante :

$$Di = Pi - ETPi$$

Où Di est le bilan hydrique potentiel pour le mois ; Pi est la quantité des précipitations cumulées pendant le mois i ; $ETPi$ est l'évapotranspiration potentielle calculée pour le mois i (Baudewyn, 2023).

L'indice suggère l'utilisation de l'équation de Thornthwaite (1948) pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle (Beguería *et al.*,

1994). C'est une formule empirique, facile à utiliser dans laquelle seules la température moyenne de l'air et la latitude sont explicitement prise en compte (Baudewyn, 2023). Selon Fatah *et al.* (2011), la formule est donnée par l'équation suivante :

$$ETP = 16 \left(10 \cdot \frac{t}{I} \right)^a \times F(\lambda)$$

Dont :

$$I = \sum_{i=1}^{12} i$$

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514}$$

Avec ETP : L'évapotranspiration potentielle mensuelle (mm) ; t : température moyenne mensuelle (°C) ; I : Indice thermique annuel ; i : indice thermique mensuel ; a : Fonction complexe de l'indice I ; $F(\lambda)$: Facteur correctif qui est fonction de la latitude du lieu considéré et du mois.

Dans cette étude, les calculs ont été faits directement dans RStudio, à l'aide du package SPEI. Les paramètres climatiques tels que les températures et les pluviométries mensuelles ont été extraites respectivement de leur fichier d'origine (Mellouki, 2023) *air.mon.mean.nc* et *full_data_monthly_v20_22_1981_2020_05.nc.gz* grâce à l'interface RStudio tout en tenant compte de la localisation du PNOD. Ces dernières sont stockées dans un nouveau fichier Excel nommé *Clim_djoudj.csv*, comportant trois colonnes que sont : années, précipitations mensuelles et températures mensuelles. L'évapotranspiration potentielle a d'abord été calculée avec la fonction *thornthwaite()* du package SPEI. Ensuite, le bilan hydrique a été calculé en soustrayant l'évapotranspiration potentielle à la pluviométrie à l'aide de la formule $Di = Pi - ETPi$. Ce dernier a permis le calcul du SPEI à différentes échelles : un, trois, six et douze mois. Les valeurs obtenues ont été par la suite tracées dans un graphique à l'aide de la fonction *plot* et analysées grâce au tableau 1. Celui-ci a permis de caractériser les années sèches et celles humides. L'évolution de la

⁴[https://www.dwd.de/EN/ourservices/gpcc/gpcc.html](https://www.dwd.de/EN/ourservices/gpcc/gpcc.html#:~:text=T)
#:~:text=T
he%20Global%20Precipitation%20Climatology%20

Centre%20%28GPCC%29%3A%20operated%20by,
for%20monitoring%20and%20research%20of%20th
e%20earth%27s%20climate

température et de la pluviométrie ont aussi été analysées à l'aide de méthodes statistiques telles que le test de Mann-Kendall et la pente de Sen. Ces derniers ont été traités sous *RStudio* à l'aide du package *trend*. Selon Sabzevari *et al.*, (2025) et Serkendiz *et al.*, (2024), le test de Mann-Kendall est un test statistique non paramétrique initialement introduit par Mann en 1945, ensuite amélioré par Kendall en 1975 et encore affiné par Hirsch *et al.*, (1991). Ce test est utilisé pour déterminer si une série temporelle présente une tendance ou non, ce qui peut être une tendance à la hausse ou à la baisse (Lu *et al.*, 2025; Rahman *et al.*, 2021). L'application du test consiste à établir une hypothèse nulle (H_0) et une alternative (H_a) :

♦ H_0 : Il n'y a pas de tendance dans la série étudiée ;

♦ H_a : Il y a une tendance dans la série étudiée.

Lorsque la p -value générée est inférieure à alpha (0,05), l'hypothèse nulle est rejetée et la tendance est significative, au cas contraire elle devient non-significative. Les résultats obtenus ont été interprétés selon les conditions suivantes :

♦ Si le « Tau de Kendall » indique une valeur négative, la tendance est à la baisse

♦ Si le « Tau de Kendall » affiche une valeur positive, la tendance est à la hausse.

En parallèle, la pente de Sen, également appelé estimateur de Theil-Sen a été utilisée. C'est une méthode statistique robuste et non paramétrique utilisé pour calculer l'ampleur des tendances dans les données temporelles à long terme (Jiqin *et al.*, 2023; Ogunrinde *et al.*, 2025). La pente de Sen fonctionne en calculant la valeur médiane entre les paires de points de données dans une série chronologique. La valeur issue de la pente de Sen n'a pas d'unité. En effet, selon Helsel *et al.*, (2002), si la tendance de Mann-Kendall est positive, la pente de Theil-Sen sera positive et si elle est négative, la pente de Theil-Sen sera également négative. Les unités de l'estimation de la pente sont les unités de la variable étudiée divisées par les unités de temps. Par exemple, si le test de tendance concerne la température, alors les unités de températures pourraient être degré Celsius et les unités de Temps seraient l'année (an), donc les unités de la pente seraient °C/an (Helsel *et al.*, 2002).

Tableau 1 : Valeurs et seuils de l'indice SPEI (Vicente-Serrano *et al.*, 2010)

Valeurs SPEI	Catégories humides	Valeurs SPEI	Catégories sèches
>2,00 et plus	Extrêmement humide	-1,00 à -1,49	Modérément sèche
1,50 à 1,99	Très humide	-1,50 à -1,99	Très sèche
1,00 à 1,49	Modérément humide	< -2,00 et moins	Extrêmement sèche
0,99 à 0	Conditions normales	-0,99 à 0	Conditions normales

3.2.2.3 Analyse de l'abondance et de la tendance des populations d'oiseaux :

L'évolution des populations d'oiseaux décrit comment celles-ci évolue avec le temps. La connaissance de cette évolution se base sur des recensements répétées dans les mêmes zones (Nagy *et al.*, 2021) et permet de statuer sur l'état de santé de ces espèces (Bruchon, 2024). En effet, selon Jones & Driscoll (2022), Spooner *et al.* (2018) et White (2019) cités dans Bruchon (2024), pour des études environnementales plus complexes, comme celles traitant l'impact du changement climatique, un suivi de plusieurs décennies peut être nécessaire pour déceler des tendances significatives. Pour déterminer cette évolution, le programme TRIM (Trend and indice for monitoring data

) de Van Strien *et al.* (2001) a été adopté. Il calcule les indices d'abondance annuels par espèce et fournit également une estimation de la tendance linéaire globale basée sur ces indices annuels et destinée à décrire l'évolution sur l'ensemble de la période d'étude (Blew & Suedbeck, 2005; Bogaart, 2024; Visser *et al.*, 2007). Des études récentes Kim *et al.* (2024) ; Astiaso Garcia *et al.* (2015) ; Zhang *et al.* (2011) ; Kasahara & Koyama, (2010) ; Voříšek *et al.* (2008) et Blew & Suedbeck (2005) ont utilisé cette méthode pour l'analyse des tendances à long terme. Ainsi, pour comprendre la tendance à long terme de la population des oiseaux, la méthode TRIM a été utilisé à l'aide du package *rtrim* (version 2.3.0) sous l'interface *RStudio* (version 4.3.2). Pour ce faire, trois

variables sont indispensables : le site, l'année de dénombrement et la taille n de chaque espèce. Le résultat obtenu est une courbe de tendance linéaire qui prend en compte les valeurs manquantes dans les données (Kim *et al.*, 2024). Dans cette étude, 1989 a été défini comme l'année de référence pour le calcul des indices, ce qui lui attribue une valeur d'indice égale à 1. Les valeurs de l'indice ont été utilisées pour tracer les courbes de tendances à l'aide de la fonction *plot()* afin de visualiser l'évolution des effectifs au cours des années. Pour chaque calcul de tendance, TRIM produit également un fichier texte, présentant les résultats et les paramètres de la procédure de calcul (Blew & Suedbeck, 2005). Pour interpréter de manière plus simple, la pente tendancielle a été utilisée. Cette dernière reflète les variations en termes de variation moyenne en pourcentage par an (Pan-European Common Bird Monitoring Scheme, s.d.). Si cette tendance est égale à 1, alors il n'y a pas de changement tandis qu'une valeur supérieure à 1 indique une augmentation, et une valeur inférieure à 1, une diminution (Pan-European Common Bird Monitoring Scheme)⁵.

Selon Pannekoek & Strien (2005), pour déterminer si une tendance est significative, on calcule l'intervalle de confiance à 95 %. La borne supérieure de l'intervalle s'obtient en ajoutant à la valeur de la pente, 1,96 multiplié à l'erreur standard tandis que la borne inférieure s'obtient en soustrayant cette même valeur. Selon Van Strien *et al.* (2001) cité par Pan-European Common Bird Monitoring Scheme (s.d.) les tendances sont classées comme suit :

- ♦ **Forte augmentation** : une pente tendancielle $>1,05$ (une augmentation de plus de 5 % par an), avec la limite inférieure de confiance de la pente $>1,05$;
- ♦ **Augmentation modérée** : une pente tendancielle comprise entre 1,00 et 1,05 (une augmentation ne dépassant pas 5 % par an), la limite inférieure de confiance de la pente se situant entre 1,00 et 1,05 ;

- ♦ **Stable** : une pente tendancielle où les intervalles de confiance chevauchent 1 (aucun changement significatif), avec la limite inférieure de confiance de changement $>0,95$ et la limite supérieure de confiance de changement $<1,05$;

- ♦ **Incertain** : une pente tendancielle où les intervalles de confiance chevauchent 1 (aucun changement significatif), avec la limite inférieure de confiance de changement $<0,95$ et/ou la limite supérieure de confiance de changement $>1,05$;

- ♦ **Baisse modérée** : une pente tendancielle $\geq 0,95$ et 1,00 (une baisse ne dépassant pas 5 % par an), la limite supérieure de confiance de la pente se situant entre 0,95 et 1,00 ;

- ♦ **Forte baisse** : une pente tendancielle $<0,95$ (une baisse de plus de 5 % par an), avec la limite supérieure de confiance de la pente $<0,95$.

3.2.2.4 Analyse de l'impact de la variabilité climatique sur l'abondance des oiseaux :

L'analyse de l'impact de la variabilité climatique sur l'abondance des espèces a été faite grâce à la statistique. Cette dernière permet de dégager les caractéristiques essentielles du phénomène étudié et de suggérer des hypothèses pour une étude ultérieure plus poussée (Polisano, 2018; Sabiki, 2023). Les traitements ont été faits sous RStudio (*version 4.3.2*). Le test de Shapiro-Wilk a été utilisé pour voir si les séries de données sont normalement distribuées. Celui-ci permet de choisir les tests paramétriques ou non paramétriques correspondant aux séries de données. Celui-ci combiné à nos données a permis de choisir le modèle GAM (Generalized Additive Models ou modèles additifs généralisés) au lieu des modèles linéaires. Le GAM est une approche populaire utilisée en écologie ; il permet de modéliser des relations fonctionnelles non linéaires entre les variables et les résultats, où la forme de la fonction elle-même varie entre différents niveaux de regroupement (Pedersen *et al.*,

⁵<https://pecbms.info/methods/pecbms-methods/1-national-species-indices-and-trends/1-2-production-of-national-indices-and-trends/trend-interpretation-and-classification>

2019). Deux types d'hypothèses ont été élaborés pour chaque relation entre une donnée climatique et l'abondance d'une espèce. L'hypothèse nulle (H_0) et celle alternative (H_a) ont ainsi été formulées :

♦ H_0 : la variable climatique n'a pas un effet direct sur l'abondance de l'espèce

♦ H_a : La variable climatique a un effet direct sur l'abondance de l'espèce.

L'hypothèse nulle est rejetée lorsque le p -value généré est inférieur à 0,05, dans le cas contraire elle ne sera pas rejetée. L'analyse avec le modèle GAM a été réalisée avec le *package Mixed GAM Computation Vehicle* (MGCV). Les résultats obtenus sont des courbes estimant l'effet de chaque relation en fonction de chaque variable explicative. Ces résultats sont

ensuite interprétées grâce aux p -values, l'Estimated Degree of Freedom (EDF) et les déviations expliquées (Explained deviance). Lorsque l'EDF est égale à 1, la relation est linéaire ; si elle est supérieure à 1, la relation est non linéaire. Les déviations montrent le pourcentage que le modèle explique à partir des données fournies. Leur capacité à identifier des seuils dépend du domaine étudié, telles que la structure des données et la nature des relations (Detmer *et al.*, 2025). Selon Maravelias *et al.*, (2012) cité dans Sward *et al.* (2022), un modèle avec une précision (déviante expliquée) comprise entre 0,4 et 0,6 (40 et 60%) est modérément suffisant, et que les modèles supérieures à 0,6 ont un pouvoir explicatif relativement élevé (Castella *et al.*, 2001).

4 RESULTATS

4.1 Variabilité du climat dans le PNOD :

La figure 2 montre la variation de l'indice standardisé d'évapotranspiration et de précipitation (SPEI) sur une échelle d'un, trois, six et douze mois. Les barres bleues

représentent les périodes humides et celles rouges, les périodes sèches. Les quatre échelles de temps visualisent des résultats relativement similaires indiquant des variabilités intermensuelles, saisonnières et interannuelles.

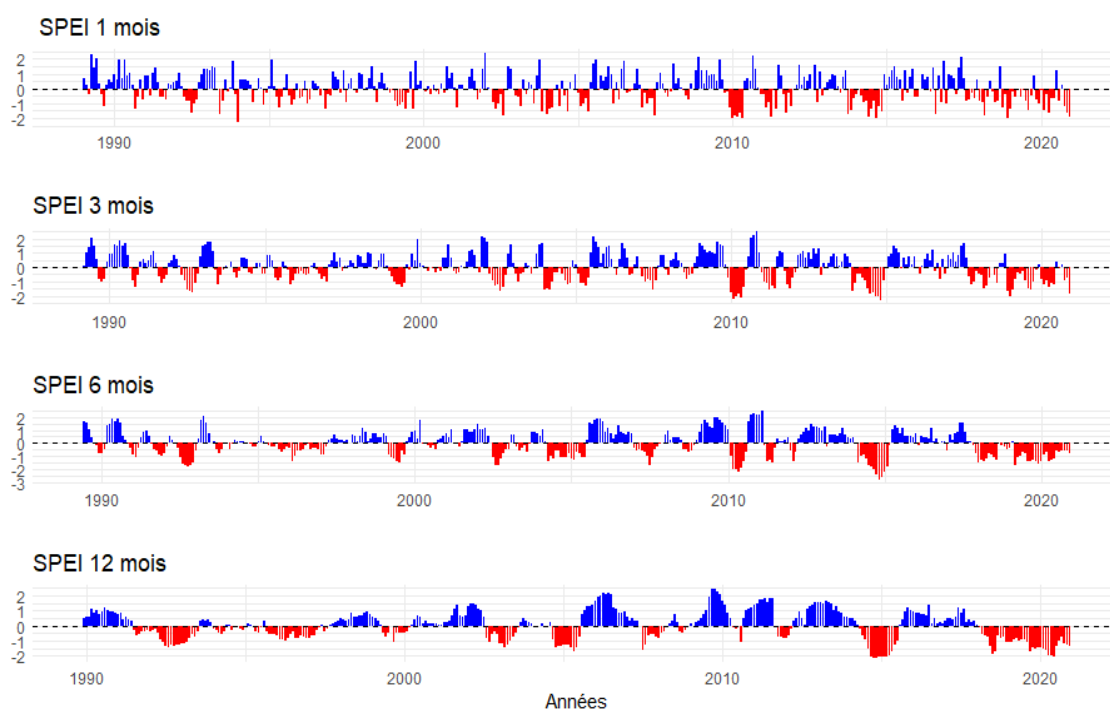


Figure 2 : Variabilités temporelles des indices standardisés de précipitation et d'évapotranspiration dans le PNOD de 1989 à 2020

Aux échelles de temps à court terme (1 et 3 mois), les intensités de sécheresses sont très variables allant de modérément sèches à extrêmement sèches à plusieurs reprises. En revanche, pour les échelles à longs termes (6 et

12 mois), les intensités de sécheresses diminuent. Ces dernières ont été appuyées par le test de Mann-Kendall qui met en évidence une tendance à la baisse du SPEI à toutes les échelles temporelles (Tableau 2).

Tableau 2 : Test de tendance de Mann-Kendall appliqué aux séries de SPEI dans le PNOD durant la période de 1989-2020.

Echelles	Tau de Kendall	P-value	Caractères p-value	Tendances
SPEI 1 mois	-0,101	0,0032098	Significatif	Baisse
SPEI 3 mois	-0,0873	0,010829	Significatif	Baisse
SPEI 6 mois	-0,0568	0,098618	Non-significatif	Baisse
SPEI 12 mois	-0,021	0,54537	Non-significatif	Baisse

Le tableau 3 illustre l'évolution de la température et de la pluviométrie sur la période d'étude de 1989 à 2020. Les résultats de l'évolution fournissent une tendance à la hausse pour les deux paramètres climatiques.

Ces tendances restent significatives au seuil de 5% pour la température et non significatives pour la pluviométrie. Cette dernière reste significative au seuil de 10%.

Tableau 3 : Test de tendance de Mann-Kendall appliqué à la pluviométrie et à la température dans le PNOD durant la période 1989-2020

Paramètres Climatiques	Tau de Kendall	P-value	Pente de Sen	Caractère p-value	Tendances
Température	0,282	0,027138	0,020	Significatif	Hausse
Pluviométrie	0,222	0,082983	0,22	Non-significatif	Hausse

4.1.2 Abondance et tendance des populations d'oiseaux d'eau : L'analyse de l'abondance des populations d'oiseaux par la méthode TRIM a fourni les résultats suivants : **Flamant Rose :** La figure 3 illustre une diminution de la population de flamant rose

dans le temps par rapport à l'année de référence. Par contre, celle-ci indique des périodes de pics durant les années 2000, 2009, 2016 et 2020 mais aussi des périodes de chutes très remarquables sont observées durant les années 1993, 1995, 2005, 2010 et en 2017.

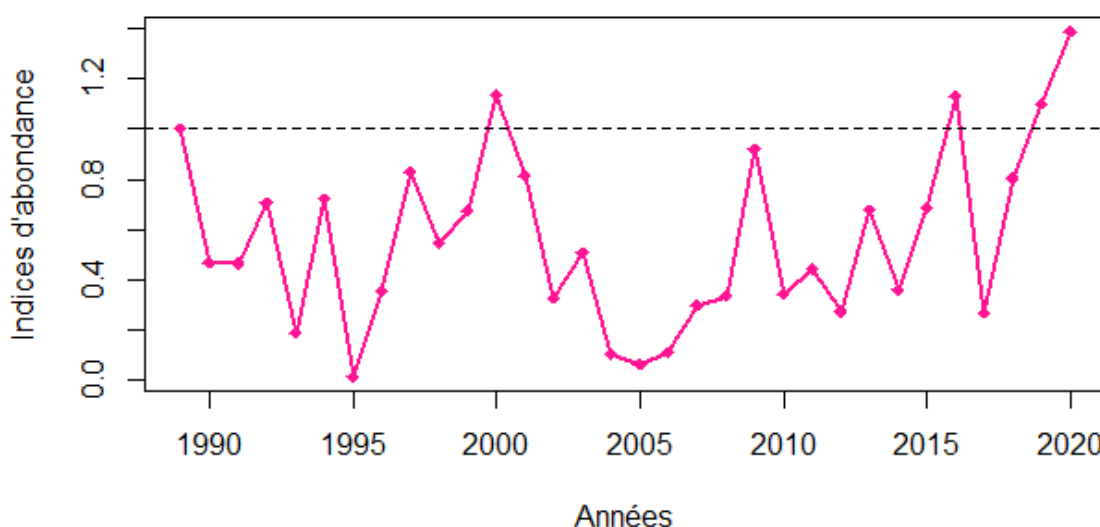


Figure 3: Courbe d'évolution de la population de flamant rose dans le PNOD de 1989 à 2020

Pélican blanc : La Figure 4 montre une évolution croissante de la population de pélicans blancs. Des années de pics sont notées durant les années 2005, 2009, 2014 et 2016. En

revanche, les chutes sont observées durant les années 1993, 1995, 1997, 2000, 2003, 2008, 2010, 2015. Les chutes se poursuivent progressivement entre 2017 et 2020.

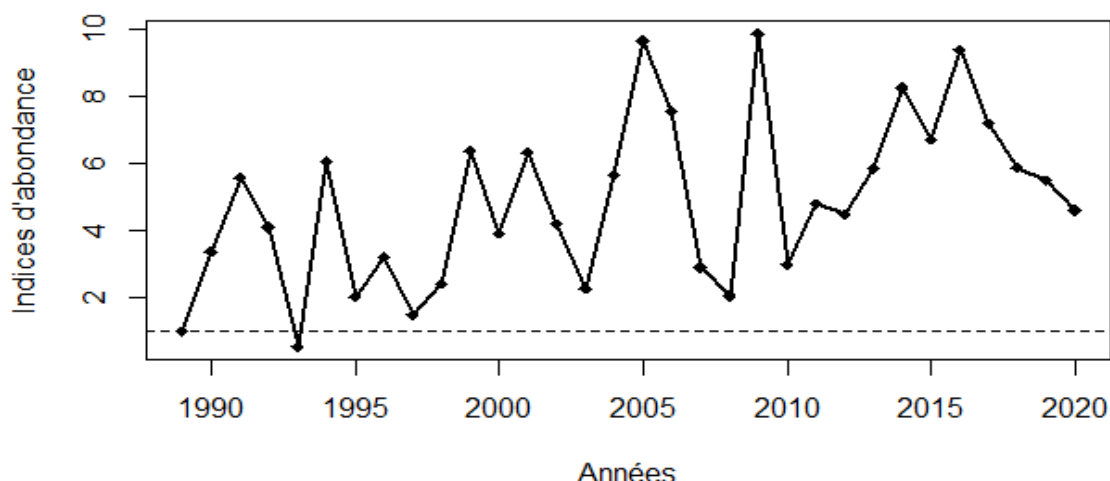


Figure 4: Courbe d'évolution de la population de pélican blanc dans le PNOD de 1989 à 2020

Dendrocygne veuf : La figure 5 visualise deux périodes. L'une allant de 1990 à 1996 montre des effectifs inférieurs par rapport à l'année 1989 et l'autre période (1997 à 2020) montre des effectifs supérieurs à l'année de référence.

Cependant, des années de pics sont observés en 2001, 2003 et des périodes de chutes en 2002 puis de 2004 jusqu'en 2007 et en 2020. A partir de 2008, les périodes de chutes et de pics s'alternent d'année en année jusqu'en 2020.

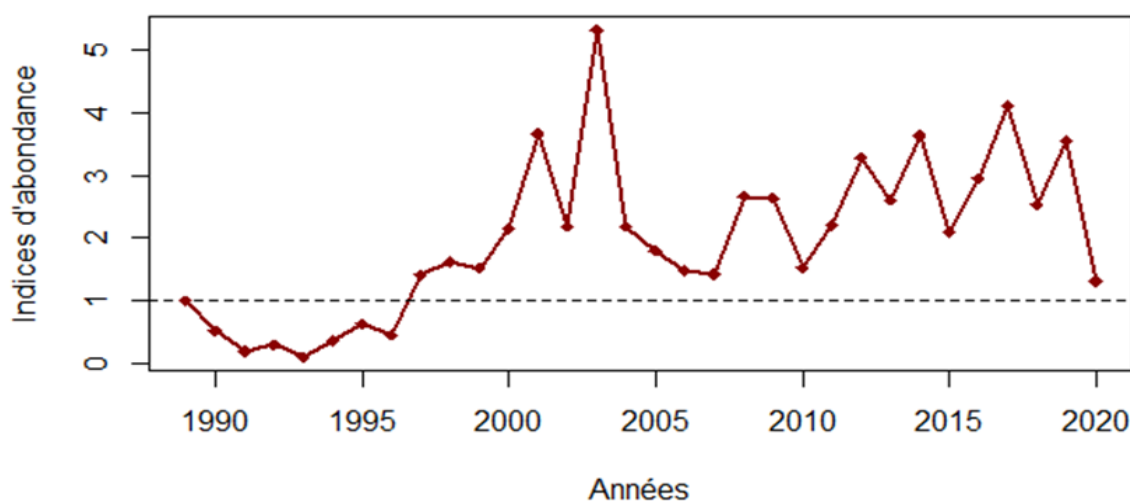


Figure 5: Courbe d'évolution de la population de dendrocygne veuf dans le PNOD de 1989 à 2020

Ces observations seront interprétées à l'aide du tableau 5 qui résume les résultats de l'analyse des populations d'oiseaux issues du modèle TRIM. Les pentes tendancielle supérieures à 1 montrent que toutes les espèces présentent une augmentation de la taille de leurs effectifs durant la période de 1989 à 2020. L'analyse de

la population des oiseaux par le modèle TRIM fournit une pente tendancielle de 1,026 pour le flamant rose soit une augmentation moyenne de 2,6% par an, une pente de 1,027 pour le pélican blanc soit 2,7% de hausse par an et 1,045 pour le dendrocygne veuf soit une augmentation de 4,5%/an.

Tableau 4 : Résultats issus de la méthode TRIM sur l'évolution des espèces d'oiseaux d'eau étudiées

Oiseaux	Pentes tendanciellles	Erreurs standard	Intervalles de confiance à 95%
Pélican blanc	1,027728	0,000199586	[1,0274 - 1,0282]
Flamant rose	1,026424	0,000159178	[1,0134 - 1,0141]
Dendrocygne veuf	1,045555	9,90138E-05	[1,0448 - 1,0452]

4.1.3 Impact de la variabilité du climat sur les effectifs d'oiseaux d'eau

Flamant Rose : La figure 6 montre les relations entre les différents paramètres climatiques et le flamant rose. Le modèle estime que les flamants roses sont plus

abondants lorsque la sécheresse est modérée et diminuent lorsqu'il fait trop humide. En parallèle, l'abondance de l'espèce diminue en fonction de l'augmentation de la température et augmente avec la pluviométrie.

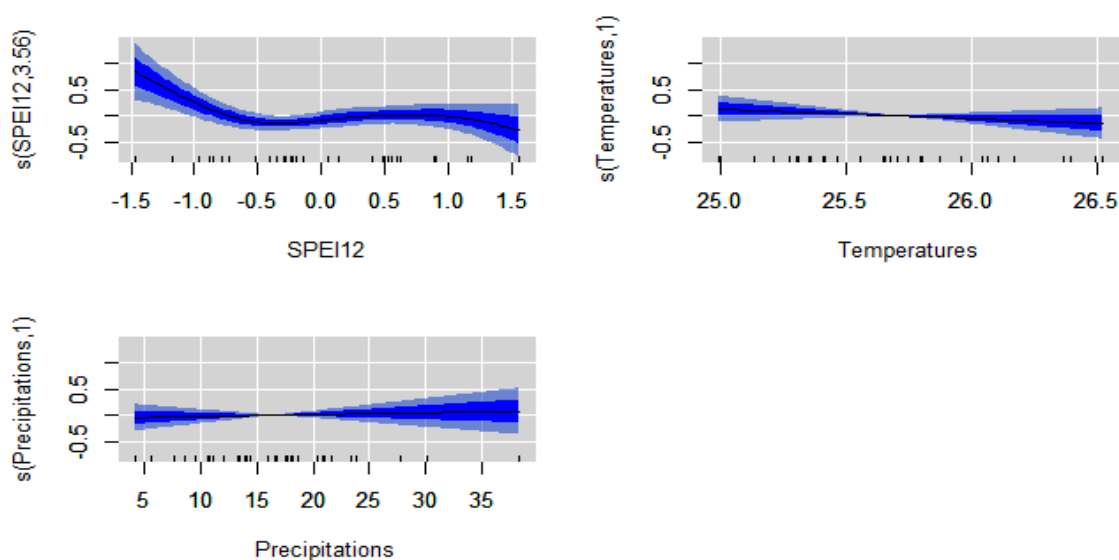


Figure 6 : Résultat des effets estimés par le modèle GAM entre les variables climatiques et l'abondance du flamant rose dans le PNOD

Pélican blanc : La figure 7 indique que les effets estimés évoluent en fonction de la sécheresse, de la température et diminuent en

fonction de l'augmentation de la pluviométrie. Toutefois ces effets restent faibles.

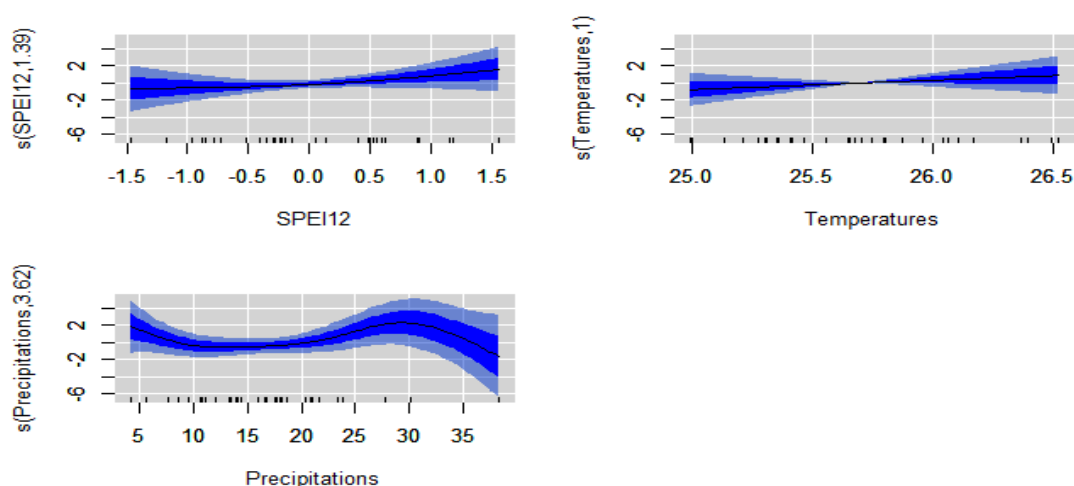


Figure 7 : Résultat des effets estimés par le modèle GAM entre les variables climatiques et l'abondance pélican blanc dans le PNOD

Dendrocygne veuf : La figure 8 illustre une linéarité entre les différentes variables étudiées. Elle montre des effets positifs mais faibles pour toutes les variables explicatives (SPEI12, Températures et Précipitations). Toutefois, ces effets restent faibles dus aux intervalles de

confiance trop larges. Ces observations seront confirmées ou infirmées grâce aux résultats fournis par le modèle GAM (Tableau 7) faites entre les paramètres climatiques et l'abondance des espèces d'oiseaux cités ci-dessus.

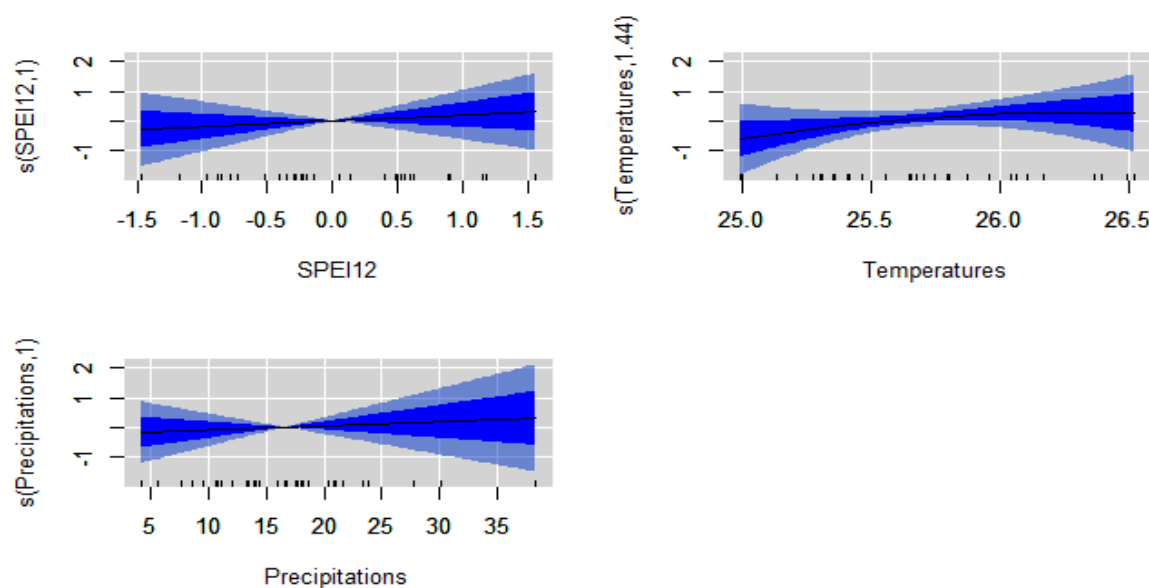


Figure 8 : Résultat des effets estimés par le modèle GAM entre les variables climatiques et l'abondance du dendrocygne veuf dans le PNOD

Le tableau 6 montre que les relations (température et pélican blanc, température et flamant, précipitations et flamant rose, précipitations et dendrocygne veuf, SPEI12 et dendrocygne veuf) sont linéaires (Edf = 1). Les autres relations dont l'Edf est supérieure à 1 sont non linéaires mais plutôt complexes. Les

déviances expliquées par le modèle GAM est de 40% pour le flamant rose, 34,4% pour le pélican blanc et 9% pour le dendrocygne veuf. Les p-values, étant tous supérieurs à 0,05 (seuil de significativité à 5%), sont non significatifs. Seule la relation entre le SPEI12 et le flamant est statistiquement prouvé.

Tableau 5 : Résultats des modèles additifs généralisés entre les variables climatiques et les différentes espèces étudiées dans le PNOD

Paramètres climatiques	Espèces	Edf	p-value (0,05)	Caractère p-value	Déviances expliquées
Précipitations	Flamant rose	1,000	0,7355 > 0,05	Non significatif	40%
Températures	Flamant rose	1,000	0,3271 > 0,05	Non significatif	
SPEI 12	Flamant rose	3,555	0,0375 < 0,05	Significatif	
Températures	Pélican Blanc	1,000	0,424 > 0,05	Non significatif	34,4%
Précipitations	Pélican Blanc	3,621	0,272 > 0,05	Non significatif	
SPEI 12	Pélican Blanc	1,393	0,462 > 0,05	Non significatif	
Températures	Dendrocygne veuf	1,436	0,558 > 0,05	Non significatif	9%
Précipitations	Dendrocygne veuf	1,000	0,739 > 0,05	Non significatif	
SPEI 12	Dendrocygne veuf	1,000	0,640 > 0,05	Non significatif	

5 DISCUSSION

5.1 Variabilité du climat dans le PNOD : L'analyse des paramètres climatiques a montré une hausse de la température indiquée par le Tau de Kendall (Tau = 0,282, $p < 0,05$) et de la pluviométrie (Tau = 0,22, $p > 0,05$). Ces résultats restent significatifs au seuil de 5% pour la température et non significatif pour la pluviométrie (Tableau 3). Ces derniers sont similaires à ceux de Faye *et al.* (2019) qui ont observé une tendance identique dans la vallée du fleuve Sénégal. L'augmentation de la température (0,02°C/an) reste identique aux résultats des travaux de Nakalembe *et al.* (2025), qui est de 0,02°C/an dans la vallée du fleuve Sénégal entre 1981 et 2020. De plus, l'étude de Bouko *et al.* (2025) menée au Bénin a présenté trois zones avec des changements différents de la température. La zone 1 présente une augmentation de 0,0124°C/an, inférieure à celle observée dans cette étude, alors que la zone 2 présente une hausse de 0,0326°C/an, supérieure au résultat de cette présente étude. En ce qui concerne la zone 3, elle montre une augmentation de 0,0235°C/an, légèrement proche de notre résultat. En outre, les études de Sène & Faye (2023), Faquseh & Grossi (2024), Kouao *et al.* (2024) et Ogunrinde *et al.* (2025) ont aussi prouvé une hausse de la température. Ces derniers appuient l'observation faite dans cette étude, et renforcent l'affirmation selon laquelle le réchauffement climatique est une réalité. L'augmentation de la pluviométrie

(0,22mm/an) obtenue dans cette étude est supérieure à celle de Nakalembe *et al.* (2025) (0,15mm/an) et inférieure à celle obtenue par Faquseh & Grossi (2024) (5,4214 mm/an). Ce dernier manque de significativité statistique comme dans cette présente étude. Les résultats acquis par Tefera *et al.* (2025) au Ghana et au Burkina Faso, se rapproche des nôtres montrant une légère hausse de la pluviométrie (Tau = 0,028) au Ghana et au Burkina Faso. L'analyse de l'indice standardisé de précipitation et d'évapotranspiration à différentes échelles temporelles (1, 3,6 et 12 mois) a indiqué une baisse des indices à toutes les échelles que sont respectivement -0,101, -0,0873, -0,0568, -0,021 (Tableau 2). Selon la classification de Vicente-Serrano *et al.* (2010), ces valeurs sont légèrement sèches avoisinant les conditions normales. La sécheresse est plus visible à court terme (SPEI 1 et 3 mois) qu'à long terme (6 et 12mois). Plus l'échelle de temps augmente, plus les valeurs diminuent et deviennent proches des conditions climatiques normales. Ces résultats sont en phases avec les travaux de Sène & Faye (2023) qui indiquent une légère sécheresse sur la période de 1950 à 2019 aux mêmes échelles dont les valeurs sont respectivement -0,41, -0,5, -0,57, -0,64. Ses résultats, étant plus négatifs que ceux obtenus dans cette étude témoignent d'une sécheresse plus sévère dans cette zone qu'au Djoudj.

5.2 Abondance et tendance des populations d'oiseaux d'eau : L'analyse de



l'abondance et de la tendance des populations d'oiseaux d'eau a montré une hausse, à l'intervalle de confiance de 95 % pour les trois espèces étudiées. Les intervalles de confiances du flamant rose, du pélican blanc et du dendrocygne veuf sont respectivement [1,0134-1,141], [1,0274-1,0282], [1,0448-1,0452]. Ces bornes sont très étroites et ne contiennent pas la valeur 1, ce qui indique des résultats statistiquement significatifs selon Van Strien *et al.* (2001). Ces résultats appuient la robustesse des estimations obtenues avec TRIM. Le flamant rose indique une pente tendancielle de 1,0264 traduisant une hausse modérée de 2,6%/an. Les tendances des populations de flamants roses issues sur le site d'IWC (International Waterbird Census, s.d.)⁶, montrent en Afrique du sud une pente de 1,0506 entre 1992 et 2023, 0,9928 en Afrique de l'Ouest entre 1979 et 2023, 0,9481 en Afrique de l'Est entre 1992 et 2023, 1,2906 en méditerranée est et ouest entre 1992 et 2015. La hausse estimée à 5,06% (forte augmentation) en Afrique du Sud et en Méditerranée est supérieure à celle observée dans le PNOD. En revanche, en Afrique de l'Ouest et de l'Est, le flamant rose diminue respectivement de 0,72% (baisse modérée) et 5,19% (forte baisse). Comparée à ces valeurs, la hausse observée des effectifs de flamant rose dans le Djoudj reste intermédiaire, ce qui pourrait témoigner de conditions probablement favorables à leur présence dans le Djoudj contrairement aux autres régions d'Afrique où leur déclin est observé. En ce qui concerne le pélican blanc, il présente une pente tendancielle de 1,0277 attestant une augmentation modérée de 2,8%/an de sa population. Les tendances des populations de pélican blanc sur le site International Waterbird Census indiquent une augmentation modérée en Afrique de l'Ouest (pente = 1,0364, soit 3,6%) entre 1991 et 2023, en Afrique du Sud (pente = 1,0104, soit 1,04%) entre 1992 et 2023, une diminution modérée en Europe et en Asie de l'Est (pente = 0,9691, soit -3,09%). La tendance observée dans le PNOD est inférieure à celle obtenue en Afrique de l'Ouest et supérieure à celles

observées en Afrique du Sud, en Europe et en Asie de l'est. Comparativement, l'évolution au Djoudj se trouve entre ces extrêmes. Elle suggère que le Djoudj parvient à offrir des conditions favorables pour le maintien de cette espèce notamment en termes d'habitat et d'alimentation en l'occurrence d'autres sites présentes en Afrique de l'Ouest. Quant au dendrocygne veuf, il indique une pente tendancielle de 1,045. Ce qui traduit une augmentation modérée de 4,5% /an de sa population. Ce résultat est cohérent avec ceux de International Waterbird Census (s.d.), qui a présenté une augmentation modérée en Afrique de l'Ouest (pente = 1,0339, soit 3,39%) entre 1992 et 2023, une hausse modérée mais plus faible en Afrique de l'est et du sud (pente = 1,0124, soit 1,24%) entre 1994 et 2023. Ainsi, les tendances en Afrique de l'Ouest, de l'Est et du Sud, bien qu'étant en hausse, reste inférieure à celle observée dans le PNOD. Cette évolution positive peut s'expliquer par l'augmentation des périmètres rizicoles qui ceinturent le parc, offrant une alimentation disponible aux dendrocygnes veufs. En effet, le riz constitue une alimentation privilégiée pour le dendrocygne veuf. Cependant, ces résultats sont en cohérence avec les tendances rapportées par IUCN (2019), (2021) et (2024), qui indiquent respectivement que les populations de flamant rose (*Phoenicopterus roseus*), de pélican blanc (*Pelecanus onocrotalus*) et de dendrocygne veuf (*Dendrocygna viduata*) sont en augmentation à l'échelle mondiale.

5.3 Impact de la variabilité du climat sur les effectifs d'oiseaux d'eau étudiés :

Les résultats issus du modèle GAM montrent que les variables climatiques expliquent 40 % de l'abondance du flamant rose, 34,4% du pélican blanc et 9% du dendrocygne veuf. Selon Maravelias *et al.* (2012) et Sward *et al.* (2022), le modèle a un pouvoir explicatif relativement modéré pour le flamant rose et faible pour le dendrocygne veuf et le pélican blanc. L'analyse a également révélé des p-values supérieures au seuil de significativité de 5% (Tableau 8). Seule la relation entre l'indice SPEI12 et l'abondance des flamants est

⁶ <https://iwcm.wetlands.org/index.php/aewatrends>

significative ($p = 0,0375$). Par conséquent, l'hypothèse nulle selon laquelle les variables climatiques n'auraient pas d'effets directs sur les populations d'oiseaux d'eau ne pourrait être rejetée. Cette non-significativité des résultats et de sous-estimations des effets est récurrente dans le domaine de la recherche environnementale (Girondot & Guillon, 2019; Yang *et al.*, 2023). En effet, l'étude de Paquet & Laudelout (2015) a montré que sur 15 espèces d'oiseaux, 9 présentaient des effets non significatifs. Ces résultats sont comparables aux nôtres qui montrent des effets non significatifs de la température sur les trois espèces d'oiseaux. Ecologiquement, cette non significativité de ces effets peut s'expliquer par le fait que ces espèces sont des homéothermes. Donc, peu importe l'augmentation de la température, ils sont capables de s'adapter. En effet, Maclean *et al.* (2017) affirment que la plupart des espèces ne seront pas directement affectées de manière défavorable par des températures plus chaudes, simplement parce que la plupart d'entre elles possèdent la capacité de régulation thermique pour faire face à la chaleur. Aussi, même si la température n'affecte pas directement les oiseaux d'eau dans le PNOD, elle est susceptible d'accélérer l'assèchement des plans d'eau entraînant ainsi une perturbation de l'habitat des oiseaux d'eau voire la disponibilité alimentaire. La pluviométrie, quant à elle, présente des p -valeurs supérieures à 0,05 pour toutes les trois espèces (Tableau 6). Cela suggère qu'il n'y aurait pas d'effet entre la pluviométrie et l'abondance de ces populations d'oiseaux. Cette absence d'effet pourrait être expliquée par le fait que le PNOD est artificiellement inondé. En effet, le parc dispose d'un système hydraulique qui lui permet d'être inondé à

partir du fleuve. Cependant, même en absence de pluies, le parc dispose de l'eau en quantité suffisante lui permettant ainsi d'attirer les oiseaux. En somme, la pluviométrie n'explique pas l'abondance des oiseaux dans le PNOD. Néanmoins, elle pourrait affecter ces oiseaux indirectement, car l'inondation du parc à partir du fleuve Sénégal dépend de la crue. Et cette dernière dépend, elle-même, des précipitations en amont. Concernant le SPEI, il affecte seulement le flamant rose ($p = 0,0375 < 0,05$). Par ailleurs, le SPEI12 n'explique pas l'abondance du pélican blanc ($p = 0,462$) ni celle du dendrocygne veuf ($p = 0,640$). Leur présence dans le parc est probablement influencée par d'autres facteurs non prise en compte dans cette étude. La sensibilité du flamant rose aux SPEI peut s'expliquer par son écologie. Le modèle montre que le flamant est plus abondant durant les périodes sèches que durant les périodes humides. En période sèche, le niveau d'eau diminue et la concentration en sel augmente dans les vasières, ce qui correspond à un milieu favorable pour le flamant, qui préfère des milieux salés ou saumâtres avec des profondeurs comprises entre 5 et 50 cm pour rechercher sa nourriture. En revanche, lorsqu'il fait humide, le niveau d'eau augmente, la salinité diminue et les conditions deviennent moins favorables pour l'espèce. En définitive, ces résultats sont en accord avec l'étude portant sur la vulnérabilité des espèces face aux changements climatiques de Maclean *et al.* (2017). Dans cette évaluation, des scores de vulnérabilités climatiques ont été attribuées aux différentes espèces. Les scores attribués sont 9 pour le flamant rose, 9 pour le pélican blanc et 3 pour le dendrocygne veuf. Ces derniers, étant inférieurs à 10, montre que ces espèces présentent une vulnérabilité minimale face aux changements climatiques.

6 CONCLUSION

Cette variabilité climatique affecte l'écosystème du Djoudj. Elle se manifeste par une augmentation de la température, des périodes de sécheresses prolongées et une irrégularité des pluies. Parmi les espèces étudiées, le flamant rose reste plus sensible aux variations du climat dans le PNOD que le pélican blanc et le dendrocygne veuf. L'un des

principaux moyens de faire face au changement climatique dans le parc est de renforcer la gestion active des sites en évitant le drainage des effluents agricoles, la dégradation et la fragmentation des habitats d'oiseaux, renforcer la gestion hydraulique. Cela protégera les espèces d'oiseaux d'eau contre des dangers tels que les périodes de



sécheresses prolongées, l'accumulation des pesticides dans leurs organismes ou d'autres facteurs qui pourraient réduire la taille de leur population. Au-delà du changement climatique, il est important de lutter contre les plantes envahissantes dans les plans d'eau afin d'accueillir le maximum d'espèces aquatiques. Celles-ci occupent la place des oiseaux diminuant ainsi les ressources alimentaires mais aussi l'abondance de ces espèces. Pour des résultats plus significatifs lors des futures études, l'approche bayésienne pourrait être utilisée pour quantifier l'ampleur du

changement climatique sur ces oiseaux. Il faut également explorer les effets indirects du changement climatique car les effets directs sont souvent faibles à modérés dus à la capacité d'adaptation de ces espèces. Une bonne base de données avec des suivis mensuels sur les effectifs d'oiseaux doit être mise en place pour déceler les tendances saisonnières du climat sur ces espèces. Enfin, cette étude pourrait être élargie en évaluant l'effet des changements climatiques sur d'autres espèces d'oiseaux d'eau menacées d'extinction.

7 REMERCIEMENTS

Nous remercions très sincèrement la Direction des Parcs Nationaux du Sénégal, le Conservateur du Parc National des Oiseaux du Djoudj et l'ensemble des agents et écogardes ayant contribué à la réalisation de cette étude. Notre reconnaissance va aussi à l'endroit de la

Coordonnatrice du projet de renforcement de la coopération transfrontière pour une meilleure gestion et restauration écosystémique dans le delta du Sénégal (Mauritanie et Sénégal) pour la subvention de recherche accordée pour cette étude.

8 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abiodun BJ, Salami AT, Matthew OJ and Odedokun, S: 2012. Potential impacts of afforestation on climate change and extreme events in Nigeria *Climate Dynamics*, 41(2), 277–293. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1523-9>
- Astiaso Garcia, D., Canavero, G., Ardenghi, F., & Zambon, M. (2015). Analysis of wind farm effects on the surrounding environment: Assessing population trends of breeding passerines. *Renewable Energy*, 80(2015), 190–196. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.004>
- Barbeta A, Ogaya R and Peñuelas J: 2013. Dampening effects of long-term experimental drought on growth and mortality rates of a Holm oak forest *Global Change Biology*, 19(10), 3133–3144. <https://doi.org/10.1111/gcb.12269>
- Baudewyn M: 2023. Détermination d'un indice de sécheresse atmosphérique des forêts en Belgique. <http://hdl.handle.net/2268.2/20828>
- Beguiría S, Vicente-Serrano SM, Reig F and Latorre, B: 1994. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring *International Journal of Climatology*, 34(10), 3001–3023. <https://doi.org/10.1002/joc.3887>
- Beintema A and Vessem JV: 1998. Strategies for Conserving Migratory Waterbirds.
- Blew J and Suedbeck P: 2005. Numbers and Trends 1 Migratory Waterbirds in the Wadden Sea 1980 – 2000 *Wadden Sea Ecosystem*, 20(20), 7–148. https://www.bioconsult-sh.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/2005/Migratory_waterbirds_in_the_Wadden_Sea_1980-2000.pdf
- Bogaart P: 2024. Package 'rtrim'. <https://cran.r-project.org/web/packages/rtrim/rtrim.pdf>
- Bouko AABSD, Gao B, Abubakar J, Annan RF, Djessou RD, Mutelo AM, El-Saadani Z and Dehah L: 2025. Characteristics of Meteorological Droughts Across Different Climatic Zones in Benin *Atmosphere* 16(5), 1–22.



- <https://doi.org/10.3390/atmos16050611>
- Brooks N: 2004. Drought in the African Sahel : Long-Term Perspectives and Future Drought in the African Sahel : l ong term perspectives and future prospects Tyndall Centre for Climate Change Research. Tyndall Centre for Climate Change Research, May, 1–38. <https://www.researchgate.net/publication/220023784>
- Bruchon TS : 2024. Modélisation des tendances à long terme des populations d’oiseaux des plaines céréalières et effets des pratiques agricoles [La Rochelle - Ecole Doctorale Euclide]. [https://andrewsforest.oregonstate.edu/sites/default/files/lter/images/ScienceSmallBites/Synopsis_EcosystemResponse to Climate Change.pdf](https://andrewsforest.oregonstate.edu/sites/default/files/lter/images/ScienceSmallBites/Synopsis_EcosystemResponse%20to%20Climate%20Change.pdf)
- Carrasco L, Jiménez-Mora E, Utrilla MJ, Pizarro IT, Reglero MM, Rico-San Román L, and Martín-Maldonado B : 2025. Birds as Bioindicators: Revealing the Widespread Impact of Microplastics. *Birds*, 6(1). <https://doi.org/10.3390/birds6010010>
- Castella E, Adalsteinsson, H, Brittain JE, Gislason GM, Lehmann A, Lencioni V, Lods-Crozet B, Maiolini B, Milner AM, Olafsson JS, Saltveit SJ and Snook DL: 2001. Macroinvertebrate richness and composition along a latitudinal gradient of European glacier-fed streams *Freshwater Biology*, 46(12), 1811–1831. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2001.00860.x>
- CCNUCC : 1992. Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Nations Unies. 25pages
- Crick HQP: 2004. The impact of climate change on birds *Ibis*, 146(SUPPL.1), 48–56. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2004.00327.x>
- Deng F, and Chen JM: 2011. Recent global CO₂ flux inferred from atmospheric CO₂ observations and its regional analyses *Biogeosciences*, 8(11), 3263–3281. <https://doi.org/10.5194/bg-8-3263-2011>
- Descroix L, Diongue NA, Panthou G, Bodian A, Sane Y, Dacosta H, Malam Abdou M, Vandervaere JP and Quantin G : 2015. Évolution récente de la pluviométrie en Afrique de l’ouest à travers deux régions : la Sénégalie et le bassin du Niger moyen. *Climatologie*, 12(March), 25–43. <https://doi.org/10.4267/climatologie.1105>
- Detmer AR, Ward EJ, Hunsicker ME, Andrews KS, Conrad M, Ferriss BE, Hazen EL, Holsman KK, Indivero J, Large SI, Malick M, Marshall KN, Munsch SH, Oken KL, Satterthwaite WH, Shotwell SK, Thompson AR and Samhuri JF: 2025. Evaluating the robustness of generalized additive models as a tool for threshold detection in variable environments. *Ecosphere*, 16(3), 1–18. <https://doi.org/10.1002/ecs2.70117>
- Dia A, Dieng PM, Diop A, Fall SM: 2002. Plan d’aménagement et de gestion du Parc national des Oiseaux du Djoudj (PNOD) et de sa périphérie. 112pages
- DPN, D. des parcs nationaux : 2017. Plan de gestion du Parc National des Oiseaux du Djoudj 2017-2021. <https://virunga.org/news/update-on-armed-attack-on-rumangabo>
- Drew DM, Allen K, Downes GM, Evans R, Battaglia M and Baker P: 2012. Wood properties in a long-lived conifer reveal strong climate signals where ring-width series do not. *Tree Physiology*, 33(1), 37–47. <https://doi.org/10.1093/treephys/tps111>
- Fall P : 1990. Le Parc National des Oiseaux du Djoudj: effets de la sécheresse et de la construction du barrage de Diama sur l’inondation et la végétation. 16(1), 1–23.
- Faquseh H and Grossi G: 2024. Trend analysis of precipitation, temperature and snow water equivalent in Lombardy region, northern Italy. *Sustainable Water*



- Resources Management*, 10(1), 1–14.
<https://doi.org/10.1007/s40899-023-00992-2>
- Fatah B, Mohamed B and Abdelhamid G: 2011. Etude comparative des différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration en zone semi-aride (cas de la région de Djelfa). Pages, 109, 109.
- Faye C : 2013. Evaluation et gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de variabilité hydroclimatique : cas du bassin versant de la Falémé.
- Faye C, Ba DD and Sy B: 2019. Quantification de la sécheresse météorologique par des indices standardisés de précipitations dans la vallée du fleuve Sénégal de 1980 à 2017. *Revue de Géographie Du Laboratoire Leïdi*, 21(December), 105–122.
- Finlayson M, Gitay H, Bellio M, Van Dam R & Taylor I : 2006. Climate variability and change and other pressures on wetlands and waterbirds: impacts and adaptation. In: Waterbirds around the world. (G.C. Boere, C.A. Galbraith & D.A. Stroud). TSO Scotland, Édimbourg, R-U.
- Ffa, Forum forestier africain. 2019. Science de base du changement climatique un compendium pour la formation professionnelle en foresterie africaine
- FRB F : 2006. Biodiversité et changement climatique. Réponses Adaptatives Au Changement Global : Résultats et Perspective, 7.
- Gadenne H : 2012. Les effets des changements climatiques et des changements d'usages sur les oiseaux d'eau migrants : une approche mécaniste chez un oiseau emblématique, la Cigogne blanche. Université de Poitiers faculté des sciences fondamentales et appliquées école doctorale gay-lussac sciences pour l'environnement.
- Girondot, M and Guillon JM : 2019. : Un guide pratique Réseau d'écotoxicologie terrestre et aquatique Comment obtenir des résultats significatifs dans vos études écotoxicologiques : un guide pratique. May 2018.
- Gregory RRD, Marchant J, Raven M, Noble D, Field R and Gibbons DW: 2003. Using birds as indicators of biodiversity File Attachments. *Ornis Hungarica*, 12–13(January 2015), 11-24
- ST-Using birds as indicators of biodivers.
- Gueye I and Sow B: 2017. Fiche descriptive Ramsar: Parc National des Oiseaux du Djoudj. March.
- Gupta T: 2022. Bird as Bio-Indicator which Help to Measure Environmental Health. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 7(5), 145–150.
- Helsel DR, Hirsch RM, Ryberg KR, Archfield SA and Gilroy EJ: 2002. Statistical Methods in Water Resources Techniques and Methods 4 – A3. 12, 333.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3133/tm4A3>
- Hirsch M R, Richard B and Richard AS: 1991. Selection of Methods for the Detection and Estimation of Trends in Water Quality. *Water Resources*, 27(5), 803–813.
- Holland MM, Hansen A, Milne BT, Callahan JT, Freckman DW, Seastedt TR, Frost T, Vandermeer J, Raynal DJ and Fiksel J: 2014. Technical Consultations on Landscape Boundaries. Penambahan Natrium Benzoat Dan Kalium Sorbat (Antiinversi) Dan Kecepatan Pengadukan Sebagai Upaya Penghambatan Reaksi Inversi Pada Nira Tebu, 69(1), 54–65.
- IPCC: 2022. Summary for policymakers. In Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Vol. 9781107025). <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.003>
- IUCN: 2019. Greater Flamingo (*Phoenicopterus roseus*). *Birds of the World*, 8235, 1–11.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.>



- 2305/IUCN.UK.2018-2.RLTS.T22697360A155527405.en
- IUCN: 2021. *Pelecanus onocrotalus* Great white pelican. In The IUCN Red List of Threatened Species (Vol. 1, Issue 3, pp. 1–9).
- IUCN: 2024. *Dendrocygna viduata*. The IUCN Red List of Threatened Species, 8235.
- Jiqin H, Gelata FT and Gameda SC: 2023. Application of MK trend and test of Sen's slope estimator to measure impact of climate change on the adoption of conservation agriculture in Ethiopia. *Journal of Water and Climate Change*, 14(3), 977–988. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.508>
- Jones JA and Driscoll CT: 2022. How does climate change impact ecosystem processes and what does long-term ecological research add to our understanding of the impacts? Long-term ecological research on climate ecosystem responses to climate change. 72. https://andrewsforest.oregonstate.edu/sites/default/files/lter/images/ScienceSmallBites/Synopsis_EcosystemResponse_to_Climate_Change.pdf
- Kamel M: 2003. Ecotone Classification Accordings to its Origin. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 6(1028–8880), 1553–1563.
- Kasahara, S., & Koyama, K. (2010). Population trends of common wintering waterfowl in Japan: Participatory monitoring data from 1996 to 2009. *Ornithological Science*, 9(1), 23–36. <https://doi.org/10.2326/osj.9.23>
- Kim EJ, Hur WH, Kim HJ, Choi YS, Kim D, Lee WS, Han S, Joo H and Choi CY: (2024). Population trend and spatio-temporal distribution of Greater White-fronted (*Anser albifrons*) and Bean Geese (*Anser fabalis*) in Korea. *Avian Research*, 15(July), 100214. <https://doi.org/10.1016/j.avrs.2024.100214>
- Kouao JM, Tagnon BO, Koffi B, Kouassi AM, Kouassi KA and Gone DL: 2024. Variabilité et tendances interannuelles du climat à l'échelle de la Côte d'Ivoire sur la période 1961-2016. *European Scientific Journal*, ESJ, 20(33), 218. <https://doi.org/10.19044/esj.2024.v20n33p218>
- Lévesque M, Saurer M, Siegwolf R, Eilmann B, Brang P, Bugmann H and Rigling A : 2013. Drought response of five conifer species under contrasting water availability suggests high vulnerability of Norway spruce and European larch. *Global Change Biology*, 19(10), 3184–3199. <https://doi.org/10.1111/gcb.12268>
- Lu Y, Yang T, Fu J and Song W : 2025. Utility of the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) to detect agricultural droughts over China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 58(January). <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102190>
- Maclean IMD, Rehfishch MM, Robinson R and Delany S: 2017. The effects of Climate Change on Migratory waterfowl in the Pacific Flyway (Issue 486).
- Maravelias CD, Tserpes G, Pantazi M and Peristeraki P : 2012. Habitat selection and temporal abundance fluctuations of demersal cartilaginous species in the Aegean Sea (Eastern Mediterranean). *PLoS ONE*, 7(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0035474>
- Mellouki H : 2023. Contribution à l'analyse du régime climatique de quelques stations de l'Est algérien. Mémoire de master en Protection des écosystèmes. Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf-Mila. 160pages
- Nagy S, Dereliev S, Stroud D, Crowe O and Burfield I: 2021. État et tendances des populations d'oiseaux d'eau migrants Sur les voies de migration d'Afrique-Eurasie en 2021. In Accord sur la conservation des oiseaux d'eau migrants d'Afrique-Eurasie (AEWA). <https://www.unep-aeewa.org/sites/default/files/publicati>



- on/AEWA Conservation Status Report_FINAL_FR_WEB.pdf
- Nakalembe C, Frimpong DB, Kerner H and Sarr MA: 2025. A 40-year remote sensing analysis of spatiotemporal temperature and rainfall patterns in Senegal. *Frontiers in Climate*, 7. <https://doi.org/10.3389/fclim.2025.1462626>
- Ogunrinde AT, Adigun P, Xue X, Koji D and Jing Q : 2025. Spatiotemporal analysis of drought patterns and trends across Africa: a multi-scale SPEI approach (1960–2018). *International Journal of Digital Earth*, 18(1), 1–25. <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2447342>
- Pannekoek J and Strien AV: 2005. TRIM 3 Manual (Trends & Indices for Monitoring data) (Issue February). <https://www.bing.com/search?q=Trends+and+indices+for+monitoring+data+guide+d%27utilisation+PDF&FORM=AWRE>
- Paquet J and Laudelout A : 2015. Les changements climatiques et les oiseaux : synthèse et impacts sur l'avifaune. January 2014.
- Pedersen EJ, Miller DL, Simpson GL and Ross N: 2019. Hierarchical generalized additive models in ecology: An introduction with mgcv. *PeerJ*, 2019(5). <https://doi.org/10.7717/peerj.6876>
- Polisano K : 2018. Cours de Statistiques (L1-MAP 201). <https://team.inria.fr/steep/files/2015/03/cours.pdf>
- Potop V: 2011. Evolution of drought severity and its impact on corn in the Republic of Moldova. *Theoretical and Applied Climatology*, 105(3), 469–483. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0403-2>
- Rahman MN, Rony MRH and Jannat FA: 2021. Spatiotemporal Evaluation of Drought Trend During 1979–2019 In Seven Climatic Zones of Bangladesh. *Heliyon*, 7(11), e08249. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08249>
- Root TL, Price JT, Hall KR, Schneider SH, Rosenzweig C and Pounds AJ: 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Letters to Nature*, 421, 57–60. https://doi.org/10.1142/9781848162044_0011
- Rosenzweig C, Karoly D, Vicarelli M, Neofotis P, Wu Q, Casassa G, Menzel A, Root TL, Estrella N, Seguin B, Tryjanowski P, Liu C, Rawlins S and Imeson A: 2008. Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. *Nature*, 453(7193), 353–357. <https://doi.org/10.1038/nature06937>
- Sabiki H : 2023. Cours : Statistique Descriptive Programme du cours S1. September. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35420.36481>
- Sabzevari Y, Eslamian S, Pamula ASP and Bazrkar MH : 2025. Drought Trend Analysis Using Standardized Precipitation Evapotranspiration Index in Cold-Climate Regions. *Atmosphere*, 16(4), 1–24. <https://doi.org/10.3390/atmos16040482>
- Séne SMK and Faye C : 2023. Characterization of wet and dry conditions in Niaoulé 's basin in a context of climate change with the Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI) Caractérisation des conditions humides et sèches du bassin du Niaoulé dans un contexte. 7(4), 1029–1038.
- Serkendiz H, Tatli H, Kılıç A, Çetin M and Sungur A: 2024. Analysis of drought intensity, frequency and trends using the spei in Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(4), 2997–3012. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04772-y>
- Servat É, Paturel JE, Lubès-Niel H, Kouamé B, Masson JM, Travaglio M and Marieu B : 1999. Regarding rainfall in non sahelian western and central Africa. *Revue Des Sciences de l'Eau*, 12(2), 363–387. <https://doi.org/10.7202/705356ar>



- Sohn SJ, Ahn, JB and Tam CY: 2013. Six month-lead downscaling prediction of winter to spring drought in South Korea based on a multimodel ensemble. *Geophysical Research Letters*, 40(3), 579–583. <https://doi.org/10.1002/grl.50133>
- Spinoni J, Antofie T, Barbosa P, Bihari Z, Lakatos M, Szalai S, Szentimrey T and Vogt J : 2013. An overview of drought events in the Carpathian Region in 1961–2010. *Advances in Science and Research*, 10(1), 21–32. <https://doi.org/10.5194/asr-10-21-2013>
- Spooner FEB, Pearson RG and Freeman R: 2018. Rapid warming is associated with population decline among terrestrial birds and mammals globally. *Global Change Biology*, 24(10), 4521–4531. <https://doi.org/10.1111/gcb.14361>
- Sward D, Monk J and Barrett NS: 2022. Regional estimates of a range-extending ecosystem engineer using stereo-imagery from ROV transects collected with an efficient, spatially balanced design. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 8(1), 105–118. <https://doi.org/10.1002/rse2.230>
- Tefera ML, Seddaiu G, Carletti A and Awada, H: 2025. Rainfall variability and drought in West Africa: challenges and implications for rainfed agriculture. *Theoretical and Applied Climatology*, 156(1). <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05251-8>
- Thornthwaite CW: 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate C. W. Thornthwaite. 38(1), 55–94.
- Toromani E, Sanxhaku M and Pasho E : 2011. Growth responses to climate and drought in silver fir (*Abies alba*) along an altitudinal gradient in Southern Kosovo. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(9), 1795–1807. <https://doi.org/10.1139/x11-096>
- Gueye M: 2023. Rapport Ex Ante du Parc National des Oiseaux de Djoudj. TREEMAC. Réseau euro-africain d'espaces naturels pour promouvoir l'amélioration des connaissances, la valorisation et la gestion de la biodiversité et des écosystèmes. 22pages
- Van Strien AJ, Pannekoek J and Gibbons DW: 2001. Indexing european bird population trends using results of national monitoring schemes: A trial of a new method. *Bird Study*, 48(2), 200–213. <https://doi.org/10.1080/00063650109461219>
- Vicente-Serrano SM, Beguería S and López-Moreno JI: 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Vicente-Serrano SM, Zouber A, Lasanta T and Pueyo Y : 2012. Dryness is accelerating degradation of vulnerable shrublands in semiarid mediterranean environments. *Ecological Monographs*, 82(4), 407–428. <https://doi.org/10.1890/11-2164.1>
- Visser H, Soldaat L, Roomen M and Strien A: 2007. Smoothing and trend detection in waterbird monitoring data using structural time-series analysis and the Kalman filter. *Journal of Ornithology*, 148(SUPL. 2). <https://doi.org/10.1007/s10336-007-0176-7>
- Voříšek, P., Gregory, R. D., Van Strien, A. J. ., & Gmelig Meyling, A. (2008). Population trends of 48 common terrestrial bird species in Europe: results from the Pan-European Common Bird Monitoring Scheme. *Revista Catalana d'Ornithologia*, 24, 4–14.
- White ER: 2019. Minimum Time Required to Detect Population Trends: The Need for Long-Term Monitoring Programs. *BioScience*, 69(1), 26–39. <https://doi.org/10.1093/biosci/biy144>



- Yang Y, Sánchez-Tójar A, O'Dea RE, Noble DWA, Koricheva J, Jennions MD, Parker TH, Lagisz M and Nakagawa S: 2023. Publication bias impacts on effect size, statistical power, and magnitude (Type M) and sign (Type S) errors in ecology and evolutionary biology. *BMC Biology*, 21(1), 1–20. <https://doi.org/10.1186/s12915-022-01485-y>
- Yu M, Li Q, Hayes MJ, Svoboda MD and Heim RR: 2013. Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the standardized precipitation evapotranspiration index: 1951-2010? *International Journal of Climatology*, 34(3), 545–558. <https://doi.org/10.1002/joc.3701>
- Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Tank, A. K., Peterson, T. C., Trewin, B., & Zwiers, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(6), 851–870. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>
- Webographie**
- International Waterbird Census. (s.d.). International Waterbird Census. Consulté le 08 01, 2025, sur Dénombrement International des Oiseaux d'Eau: <https://iwc.wetlands.org/index.php/aewatrends>
- Pan-European Common Bird Monitoring Scheme. (s.d.). Consulté le 05 07, 2025, sur <https://pecbms.info/methods/pecbms-methods/1-national-species-indices-and-trends/1-2-production-of-national-indices-and-trends/trend-interpretation-and-classification>
- Ndiaye, I. (2023, 01 09). Images drones . Saint-Louis, Sénégal. Consulté le 07 01, 2025, sur D:\IDRISSA NDIAYE PHOTOS\images drones\org_1a6a9d9602af4a06_1673280980000.jpg
- Ndiaye, I. (2024, 06 11). Photos oiseaux Djoudj. Saint-Louis, Sénégal. Consulté le 07 01, 2025, sur D:\IDRISSA NDIAYE PHOTOS\Photos oiseaux Djoudj\P1080192.JPG
- Ndiaye, I. (2024, 06 10). Photos Oiseaux Djoudj. Saint-Louis, Sénégal. Consulté le 07 01, 2025, sur D:\IDRISSA NDIAYE PHOTOS\Photos oiseaux Djoudj\P1080146.JPG
- <https://www.dwd.de/EN/ourservices/gpcc/gpcc.html#:~:text=T%20he%20Global%20Precipitation%20Climatology%20Centre%20%28GPCC%29%3A%20operated%20by,for%20monitoring%20and%20research%20of%20the%20earth%27s%20climate>
- <https://www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.ghcncams.html>
- <https://www.toutvert.fr/ornithologie-infos>. Consulté le 27 12, 2025