

Évaluation de la pollution azotée minérale des eaux superficielles de la zone humide Ramsar du lac Fetzara (Nord-Est algérien)

Evaluation of the mineral nitrogen pollution of the surface waters of the Ramsar wetland of Lake Fetzara (North-East Algeria)

Khaoula Boulaksaa et Aziz Laifa

Volume 32, numéro 4, 2020

Reçu le 9 décembre 2019, accepté le 27 février 2020

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/1069574ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/1069574ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Boulaksaa, K. & Laifa, A. (2020). Évaluation de la pollution azotée minérale des eaux superficielles de la zone humide Ramsar du lac Fetzara (Nord-Est algérien). *Revue des Sciences de l'Eau / Journal of Water Science*, 32(4), 409–419. <https://doi.org/10.7202/1069574ar>

Résumé de l'article

Par sa taille et sa spécificité, la zone humide Ramsar du lac Fetzara est représentative du type rare de zone humide naturelle de la région méditerranéenne. L'activité agropastorale pratiquée dans sa zone périphérique et les eaux résiduaires des agglomérations urbaines avoisinantes constituent des sources potentielles de pollution de ses eaux par les éléments nutritifs. Cette étude a été menée avec l'objectif d'évaluer la pollution des eaux superficielles de la zone humide du lac Fetzara par l'azote minéral. Par une approche physicochimique spatiotemporelle, les résultats analytiques obtenus montrent que les eaux de cette zone humide ne sont pas polluées par l'ion nitrate, alors que la majorité de ces eaux sont riches en ions nitrites. L'activité agricole qui caractérise cette zone serait la source directe ou indirecte de pollution. En ce qui concerne la contamination en ions ammonium, toutes les stations étudiées présentent une pollution nette avec des valeurs maximales (jusqu'à 20,7 mg·L⁻¹) dans les stations qui reçoivent des eaux résiduaires urbaines. Les concentrations en azote minéral deviennent considérablement élevées au cours de l'année 2016 et varient spatialement selon la distance d'éloignement de la source de pollution et par rapport à la saison, humide et sèche.

ÉVALUATION DE LA POLLUTION AZOTÉE MINÉRALE DES EAUX SUPERFICIELLES DE LA ZONE HUMIDE RAMSAR DU LAC FETZARA (NORD-EST ALGÉRIEN)

Evaluation of the mineral nitrogen pollution of the surface waters of the Ramsar wetland of Lake Fetzara (North-East Algeria)

KHLOULA BOULAKSAA*, AZIZ LAIFA

Laboratoire de Recherche en Sols et Développement durable, Faculté des Sciences, Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba, 23000, Algérie

Reçu le 9 décembre 2019, accepté le 27 février 2020

RÉSUMÉ

Par sa taille et sa spécificité, la zone humide Ramsar du lac Fetzara est représentative du type rare de zone humide naturelle de la région méditerranéenne. L'activité agropastorale pratiquée dans sa zone périphérique et les eaux résiduaires des agglomérations urbaines avoisinantes constituent des sources potentielles de pollution de ses eaux par les éléments nutritifs. Cette étude a été menée avec l'objectif d'évaluer la pollution des eaux superficielles de la zone humide du lac Fetzara par l'azote minéral. Par une approche physicochimique spatiotemporelle, les résultats analytiques obtenus montrent que les eaux de cette zone humide ne sont pas polluées par l'ion nitrate, alors que la majorité de ces eaux sont riches en ions nitrites. L'activité agricole qui caractérise cette zone serait la source directe ou indirecte de pollution. En ce qui concerne la contamination en ions ammonium, toutes les stations étudiées présentent une pollution nette avec des valeurs maximales (jusqu'à 20,7 mg·L⁻¹) dans les stations qui reçoivent des eaux résiduaires urbaines. Les concentrations en azote minéral deviennent considérablement élevées au cours de l'année 2016 et varient

spatialement selon la distance d'éloignement de la source de pollution et par rapport à la saison, humide et sèche.

Mots-clés : *azote minéral, eaux, pollution, lac Fetzara, zone humide, Algérie.*

ABSTRACT

By its size and specificity, the Ramsar wetland of Lake Fetzara is representative of the rare type of natural wetland in the Mediterranean region. The agropastoral activity practiced in its peripheral zone and the wastewater of the surrounding urban agglomerations constitute potential sources of pollution of the lake waters by nutritive elements. This study was conducted with the objective of assessing the pollution of surface waters of the Fetzara Lake wetland by mineral nitrogen. By a spatio-temporal physicochemical approach, the analytical results obtained show that the wetland waters are

not polluted by the nitrate ion, whereas the majority of these waters are rich in nitrite ions. The agricultural activity that characterizes this area would be the direct or indirect source of this pollution. With regard to ammonium ion contamination, all the stations studied have net pollution with maximum values (up to 20.7 mg·L⁻¹) in stations receiving urban wastewater. The mineral nitrogen concentrations become considerably high during the year 2016 and vary spatially depending on the distance from the source of pollution and with respect to the wet and dry seasons.

Key words: *mineral nitrogen, water, pollution, Lake Fetzara, wetland, Algeria.*

1. INTRODUCTION

L'azote est un élément essentiel de la vie (SAVARY, 2010). Il est relativement abondant dans la biosphère où il circule sous des formes minérales et organiques à l'état particulaire, dissous et gazeux (BERNAUD et FUSTEC, 2007). Sa présence excessive dans les eaux, en particulier sous la forme d'ions nitrate, nitrite et d'ammonium, pose un problème de pollution et d'écotoxicité (BORDET, 2007). La pollution azotée des eaux naturelles est liée principalement aux activités domestiques, agricoles et industrielles (DORE, 1989). La présence des ions nitrate en quantité importante dans les eaux superficielles et souterraines contribue respectivement à l'eutrophisation des milieux aquatiques et à une dégradation de la ressource en eau (SAVARY, 2010). Les ions nitrate peuvent être à l'origine de la formation d'ions nitrite et de nitrosamines, responsables de deux phénomènes potentiellement pathologiques : méthémoglobinémie et cancer (ROUYRRE, 2003). Par sa taille et sa spécificité, le lac Fetzara est l'un des plus importants lacs de l'extrême Nord-Est algérien. Elles lui ont permis son inscription officielle sur la liste des zones humides d'importance internationale (Ramsar) (HABES, 2013). Le lac Fetzara constitue le site de nidification et d'hivernage le plus important de l'Est. Il accueille en moyenne plus de 30 000 oiseaux d'eau en hiver (DGF, 2003). La protection de tout son site est par conséquent une exigence incontournable. Dans la région du lac Fetzara, la chimie des eaux est souvent influencée par l'effet de la dissolution des formations géologiques, l'évaporation des eaux, les rejets industriels, les rejets d'eaux résiduaires urbaines ainsi que par l'activité agricole (ZAHY *et al.*, 2013). L'objectif de cette étude consiste en l'évaluation de la pollution azotée minérale des eaux superficielles de la zone humide de ce lac par une approche d'analyse physicochimique spatiotemporelle.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Présentation du lac Fetzara

Le lac Fetzara est situé au nord-est de l'Algérie. Il se trouve au sud-ouest de la ville d'Annaba à 14 km du littoral marin (Figure 1). D'une superficie d'environ 18 600 ha, il s'étale sur une dépression de 17 km d'ouest en est et de 13 km du nord au sud (DJAMAI *et al.*, 2011). Il s'étend sur une plaine d'alluvions récentes du Quaternaire constituées de limons, sables, graviers et travertins. Dans les versants de son bassin apparaissent des affleurements de flysch de grès de Numidie, alternant avec des lits d'argile formant les reliefs des massifs du nord-ouest et du sud, datés de l'Éocène supérieur et associés à des affleurements de marne à ammonites pyriteuses du Crétacé inférieur, ainsi que du calcaire du Trias. Au nord sont localisées des roches éruptives et métamorphiques (schistes cristallins et granites) du Trias. Quelques affleurements de calcaire et calcaire marneux phosphatés de l'Éocène moyen et inférieur se présentent au sud (GHI, 2010). Dans le lac Fetzara, on distingue quatre classes de sols : sols peu évolués, vertisols, sols hydromorphes et sols halomorphes (AJCI, 1985). Son climat de type méditerranéen subhumide est caractérisé par deux saisons contrastées, une période humide et fraîche de huit mois (s'étalant du mois d'octobre jusqu'au mois de mai) et une période sèche et chaude de quatre mois (de juin à septembre) (DJAMAI, 2007). Ce lac est alimenté en eau par les eaux pluviales tombant directement dans sa cuvette et celles provenant des massifs montagneux environnants par l'intermédiaire de cours d'eau qui reçoivent aussi les effluents liquides des zones urbaines et industrielles périphériques. Ses principaux cours d'eau sont oued El Hout au sud, oued Mellah à l'ouest et oued Zied au nord-est (DGF, 2003). À la périphérie du lac existent plusieurs agglomérations : au nord, le chef-lieu de la commune de Berrahal, au sud les territoires des communes d'El Eulma (oued El Hout) et de Cheurfa et à l'est les petits villages d'El Gantra et d'oued Zied (HABES, 2013). Les terres agricoles représentent environ le tiers de la superficie totale du lac. Elles sont situées en grande partie sur les terrains dont l'altitude est supérieure à 12 m (AJCI, 1985). L'élevage se concentre dans la périphérie du lac Fetzara (FEKRACHE, 2014). La plupart des industries dans la région du lac Fetzara ne sont pas raccordées à un quelconque réseau d'assainissement et même s'il existe, il ne fonctionne pas d'une manière satisfaisante. Par conséquent, des effluents chimiques fortement colorés et toxiques rejoignent le lac Fetzara, polluant de ce fait ses eaux et les eaux souterraines adjacentes (KHELFAOUI *et al.*, 2012).

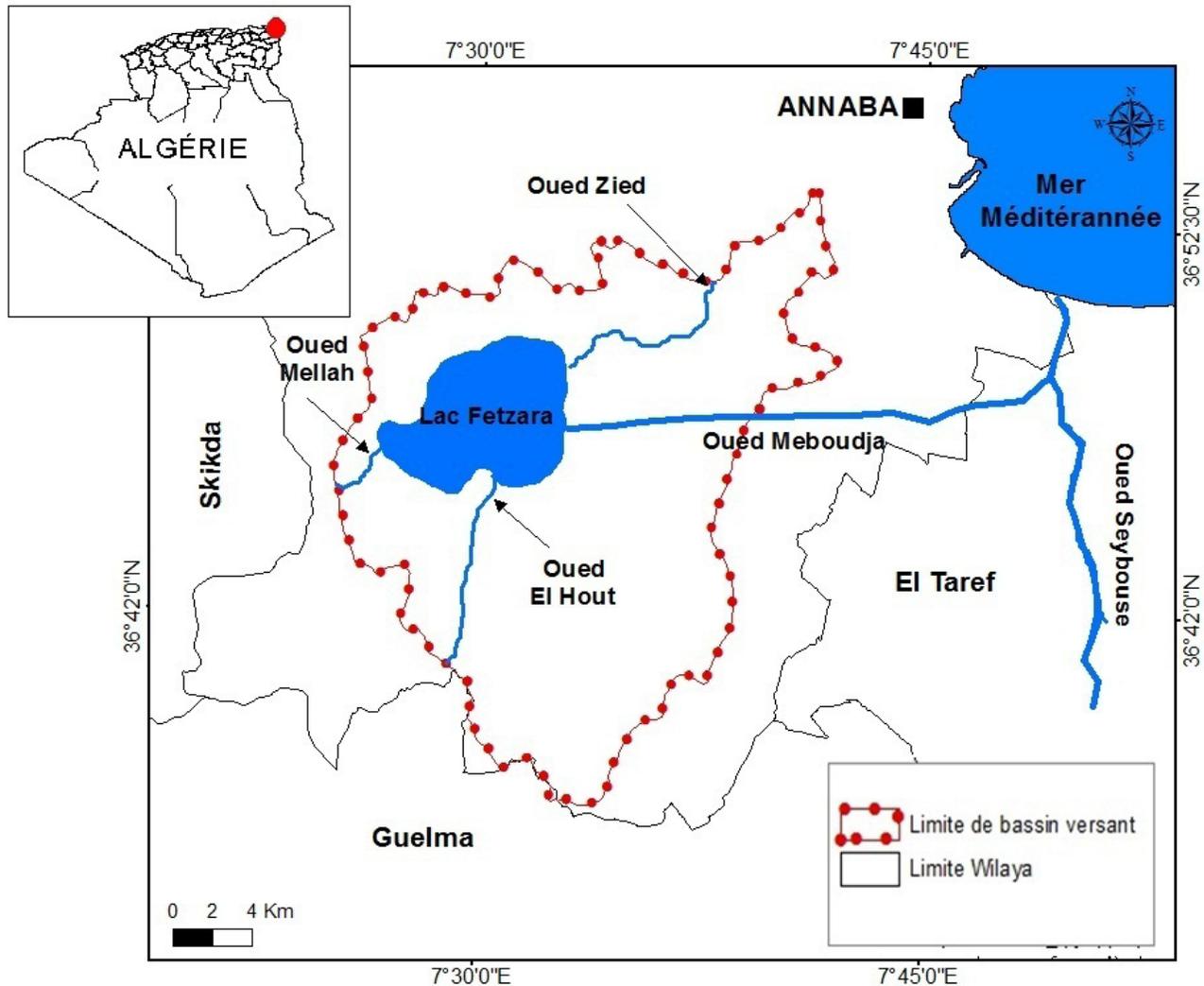


Figure 1. Situation géographique du lac Fetzara (FEKRACHE, 2018).
Geographical situation of Fetzara Lake (FEKRACHE, 2018).

2.2 Échantillonnage et analyses physicochimiques

Quatre campagnes d'analyses physicochimiques des eaux du lac Fetzara ont été effectuées dans six stations durant les mois de janvier (saison humide) et de juin (saison sèche) des années 2015 et 2016 (Figure 2). Le choix des stations d'échantillonnages a été effectué afin d'avoir des informations plus précises sur les trois oueds qui alimentent le lac (oued Zied, oued El Hout et oued Mellah), sur le lac et sur l'oued Meboudja, assurant le drainage des eaux du lac (Tableau 1), puisque la qualité physicochimique des eaux du lac Fetzara et son évolution sont sous la dépendance des entrées et des sorties d'eau dans le lac. Les échantillons d'eau prélevés sont conservés dans des flacons en polyéthylène téréphtalate de volume 1,5 L et transportés dans une glacière jusqu'au laboratoire où sont réalisées les mesures de certains paramètres chimiques. La température, le potentiel d'hydrogène (pH), la conductivité électrique (CE) et l'oxygène dissous (O_2d) ont été

mesurés *in situ* dans les échantillons d'eau à l'aide d'une sonde multiparamètres HANNA HI982/X. L'analyse chimique des échantillons d'eau a été réalisée au Laboratoire de recherche en sols et développement durable de l'Université Badji Mokhtar d'Annaba (Algérie). Elle concerne les ions nitrate (NO_3^-), les ions nitrite (NO_2^-) et les ions ammonium (NH_4^+) qui sont dosés par spectrophotométrie, et les ions chlorure (Cl^-) qui sont quantifiés par titrimétrie (RODIER, 1978).

Le moyen statistique que nous avons utilisé pour le traitement des données est l'analyse en composantes principales (ACP) grâce à l'utilisation du logiciel Xlstat version 2016. La comparaison des moyennes de chacun des paramètres physicochimiques de deux saisons (humide et sèche) se fait par le test *t* de Student pour échantillons indépendants à l'aide du logiciel Minitab version 2016.

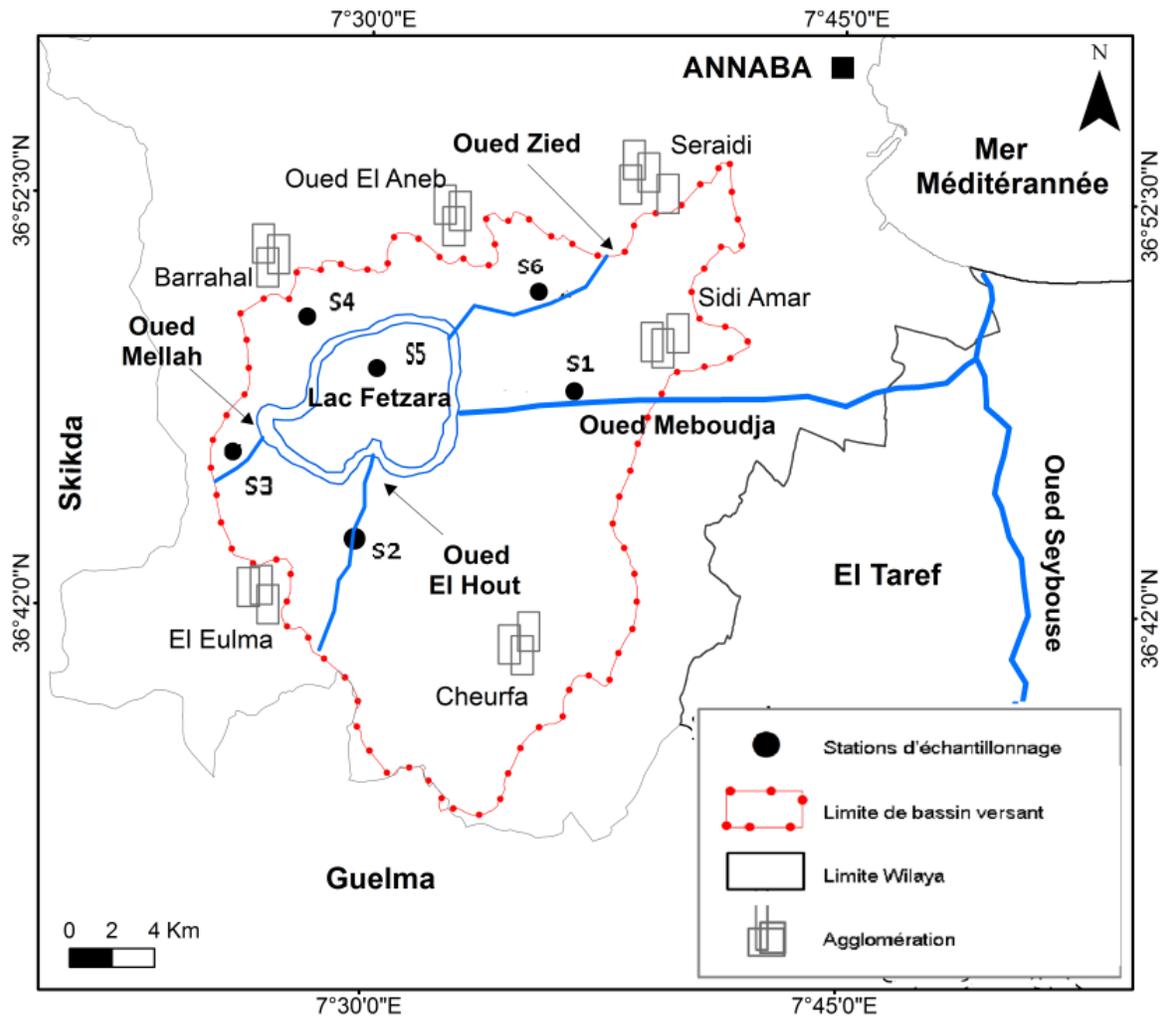


Figure 2. Distribution spatiale des stations d'échantillonnage.
Spatial distribution of sampling stations.

Tableau 1. Rejets éventuels à proximité des stations de prélèvements.
Table 1. Possible discharges in the vicinity of sampling stations.

Station de prélèvement	Code	État d'écoulement	Rejets éventuels
Oued Meboudja	S1	Courant	Élevage, urbains (DGF, 2003)
Oued El Hout	S2	Courant	Élevage, urbains (DGF, 2003)
Oued Mellah	S3	Courant	Lessivage agricole, urbains
Lac 1	S4	Stagnant	Lessivage agricole (ZAHY <i>et al.</i> , 2013) Urbains (HABES, 2013)
Lac 2	S5	Stagnant	Industriels (KHELFAOUI <i>et al.</i> , 2012) Lessivage agricole (ZAHY <i>et al.</i> , 2013) Urbains (HABES, 2013)
Oued Zied	S6	Courant	Industriels (KHELFAOUI <i>et al.</i> , 2012) Urbains (HABES, 2013)

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Caractéristiques physicochimiques des eaux du lac Fetzara

3.1.1 Paramètres de terrain (*in situ*)

3.1.1.1 Température (T)

La température de l'eau est un facteur écologique très important qui régit pratiquement la totalité des réactions physiques, chimiques et biologiques (CHAPMAN et KIMSTCH, 1996). L'évolution temporelle de la température de l'eau du lac Fetzara (Figure 3a) montre des valeurs minimales en hiver et maximales en été. Ces valeurs oscillent entre 11 °C (station 1) et 18 °C (station 5) en période humide, et entre 23 °C (station 3) et 25 °C (station 6) en période sèche. Ces variations de température suivent celles du climat de la région (FEKRACHE, 2014; MERGHEM *et al.*, 2016), tout en restant inférieures à la valeur maximale de 25 °C (JORA, 2011).

3.1.1.2 Potentiel hydrogène (pH)

Correspondant à la concentration d'ions d'hydrogène, le pH permet de mesurer l'acidité ou la basicité d'une eau (SAVARY, 2010). Les directives du Conseil des communautés européennes précisent que l'eau ne doit pas être agressive en indiquant comme valeurs guides : $6,5 < \text{pH} < 9,5$ (RODIER *et al.*, 2009). Le pH des échantillons d'eau est compris entre un minimum de 7,2 et un maximum de 8,9 (Figure 3b). Ces valeurs sont considérées normales, car elles se situent dans la gamme de 6,5 à 9,5. Le pH des eaux du lac Fetzara correspond alors au type d'eau alcaline (DROUART et VOUILLAMOZ, 1999).

L'environnement physique caractérisé en partie par des terrains calcaires serait probablement à l'origine de cette alcalinité (BOU SAAB *et al.*, 2007; GOUASMIA *et al.*, 2016). Il est important aussi de noter que les valeurs du pH sont diminuées en période sèche dans la majorité des stations. Cette diminution traduit l'augmentation de la minéralisation qui entraîne une élévation de la force ionique de l'eau et donc une diminution du pH (ZAHY, 2014).

3.1.1.3 Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique est proportionnelle à la teneur globale en espèces minérales ionisées et elle varie en fonction de la température (SAVARY, 2010). Les valeurs de la conductivité électrique des eaux du lac Fetzara oscillant entre 685 et 1 200 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (Figure 3c) correspondent à une minéralisation importante à élevée (RODIER *et al.*, 2009). Les valeurs les plus fortes sont trouvées dans la station 5. Cette dernière, qui est située dans la partie la plus basse du lac, est très affectée par les apports salifères (ZAHY, 2014). Les variations des facteurs climatiques constituent également une source de la variation de la minéralisation. En effet, au cours de la saison pluvieuse, les concentrations baissent à cause de la dilution par les eaux

pluviales. Par contre, au cours de la saison sèche, l'évaporation importante entraîne un accroissement des concentrations en ions minéraux (FEKRACHE, 2014; KOTCHI *et al.*, 2016).

3.1.1.4 Oxygène dissous (O_2)

L'oxygène dissous est un des principaux facteurs de régulation du cycle de l'azote. Sa présence ou son absence est déterminante pour les processus de transformation des formes minérales de l'azote (MONTUELLE, 2003). Pour l'ensemble des échantillons d'eau prélevés, l'oxygène dissous présente d'importantes variations irrégulières par rapport à l'espace et au temps avec des valeurs limites de 0,2 et 8,4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Figure 3d). Toutefois, en période humide des concentrations élevées en oxygène dissous sont observées dans la majorité des stations. Ceci est essentiellement dû au refroidissement des eaux pendant la saison froide qui maintient l' O_2 dans la masse d'eau (HÉBERT et LÉGARÉ, 2000) et réduit l'activité bactérienne. En outre, les vitesses des vents engendrent un brassage continu de la masse d'eau et par conséquent un enrichissement de la phase dissoute en oxygène dissous pendant la saison humide (MERGHEM *et al.*, 2016). Cependant à la station 1, la faible concentration en oxygène dissous (0,2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) en saison humide serait liée à un phénomène d'ammonification très consommateur de l'oxygène puisque des quantités élevées en ammonium sont également observées dans cette station (OUHMIDOU *et al.*, 2015).

3.1.2 Étude au laboratoire

3.1.2.1 Ion chlorure

Les teneurs en ions chlorure (Cl^-) varient globalement entre 156 et 10 650 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, avec un pic important dans la station 5 (Figure 4a). Comme pour la conductivité électrique, cette augmentation serait liée à des apports salifères importants (ZAHY, 2014). L'évolution temporelle est marquée par un léger abaissement des teneurs en chlorures pendant la saison humide par rapport à la saison sèche résultant de la dilution par les eaux de précipitation pendant cette saison (MAKHOUKH *et al.*, 2011). Comparées à la grille de qualité des eaux de surface (ANRH, 2009), la majorité des eaux de la zone humide du lac Fetzara présentent une pollution notable à une pollution importante.

3.1.2.2 Azote minéral

L'analyse des concentrations des ions nitrate dans les eaux de la zone humide du lac Fetzara montre que les quantités les plus élevées sont enregistrées dans les stations 4 et 5 (Figure 4b). Ces stations sont situées dans la partie centrale du lac et reçoivent toutes les eaux collectées. Les échantillons d'eau de l'année 2016 sont plus riches en ions nitrate que ceux de l'année 2015. Cette augmentation peut être due aux activités agricoles qui caractérisent cette zone (ROUABHIA, 2012). Il est important aussi de noter que les concentrations en ions nitrate suivent une évolution inverse à celle des teneurs en ions ammonium

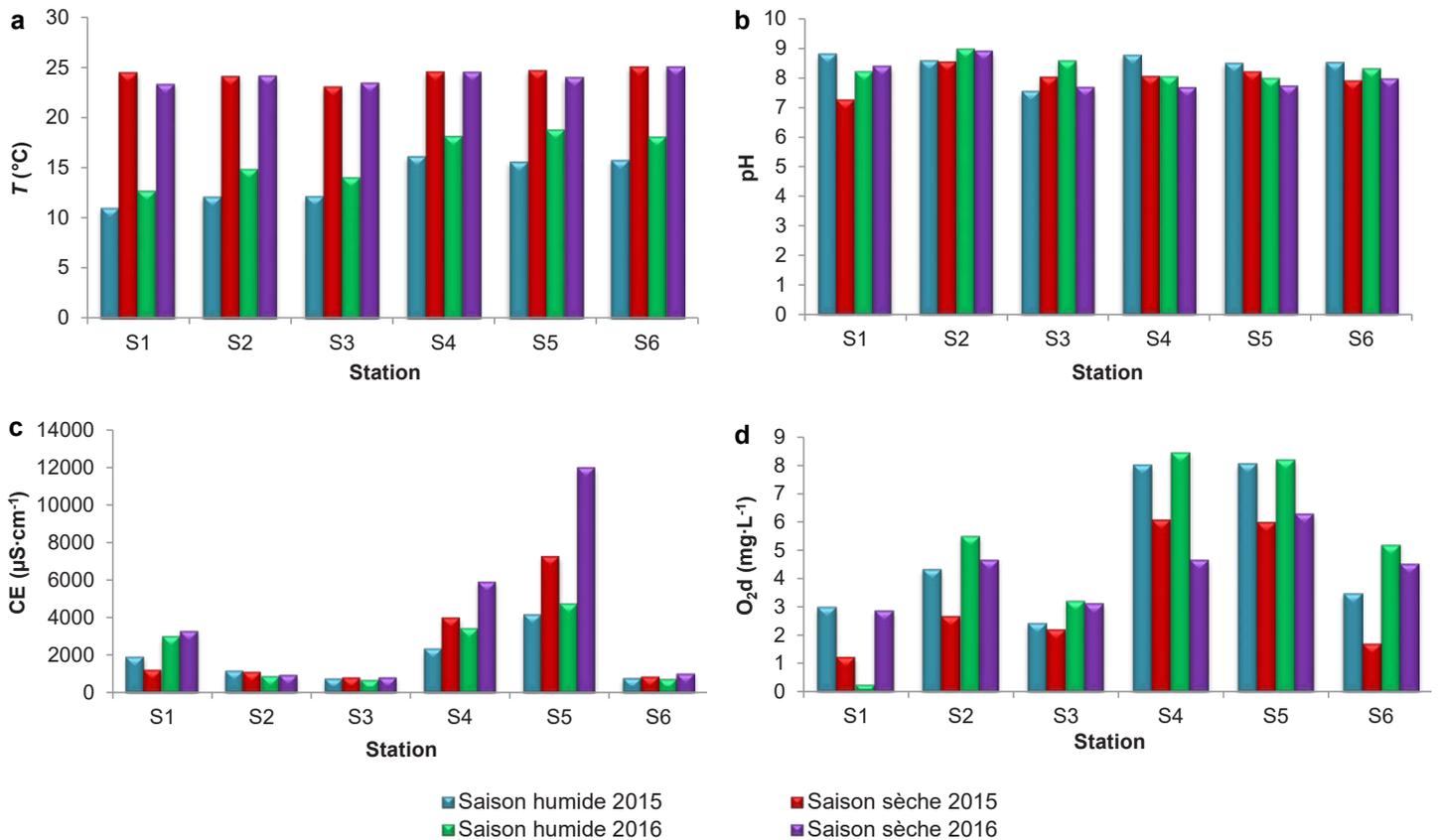


Figure 3. Variation des paramètres physico-chimiques des eaux superficielles du lac Fetzara : a) température (T), b) pH, c) conductivité électrique (CE), d) oxygène dissous (O_2d).
Variation in the physico-chemical parameters of the surface waters of Lake Fetzara: a) temperature (T), b) pH, c) electrical conductivity (EC), d) dissolved oxygen (O_2d).

dans la majorité des stations étudiées. Elles sont faibles pendant les périodes des hautes eaux en raison de la dilution par les eaux de pluie et fortes pendant les périodes des basses eaux où les pluies sont rares et l'évaporation est intense (BOUGHERIRA et AOUN-SEBAITI, 2012; KOTCHI *et al.*, 2016). Aussi, la nitrification contribue de façon non négligeable dans la transformation de l'ion ammonium vers l'ion nitrite et l'ion nitrate par oxydation (FUSTEC et LEFEUVRE, 2000). Cette réaction est optimale en présence de l'oxygène dissous (SIGG *et al.*, 2006). Les nitrates produits peuvent dans des conditions particulières et assez rares, être réduits en ammonium, mais ils sont d'une manière générale éliminés par dénitrification (BERNAUD et FUSTEC, 2007). On peut conclure que les teneurs en ions nitrate enregistrées dans les eaux du lac Fetzara sont inférieures à la teneur suggérée par les normes algériennes et internationales ($50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

Pour le cas de l'ion ammonium dont l'origine est essentiellement urbaine (MONTUELLE, 2003; BRAHIMI et CHAFI, 2014), les concentrations sont toutes supérieures à $0,5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Figure 4c), valeur limite recommandée par l'Union européenne (SAVARY, 2010). Ceci permet de classer l'ensemble de ces eaux dans les catégories de pollution notable

à importante (ANRH, 2009). Il est important aussi de noter que les teneurs en ions ammonium sont plus importantes en hiver qu'en été. Cette augmentation peut s'expliquer par les conditions défavorables à la nitrification dont notamment une température basse (VILAGINÈS, 2000). Cependant, la station 6 en fait exception, car ses concentrations en ions ammonium deviennent très élevées (jusqu'à $20,7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) en période estivale. À cette période, cette station qui représente l'oued Zied, est alimentée uniquement en eaux résiduaires urbaines (HABES, 2013) qui sont généralement très enrichies en ions ammonium essentiellement par l'ammonification des substances azotées. En outre, les concentrations en ion ammonium sont devenues considérablement fortes au cours de l'année 2016.

Les ions nitrites (NO_2^-) sont présents dans le sol, dans les eaux naturelles et dans les plantes, mais en quantités relativement faibles (SAVARY, 2010). Très réactifs, ces ions interviennent dans de nombreux phénomènes de toxicité dont les plus connus sont la méthémoglobinémie et la production de nitrosamines dans l'estomac de l'homme et des espèces animales (LACAZE, 1996). Dans les eaux de la zone humide du lac Fetzara, une très grande variabilité saisonnière et annuelle des teneurs en ions nitrite est révélée avec une tendance à l'augmentation

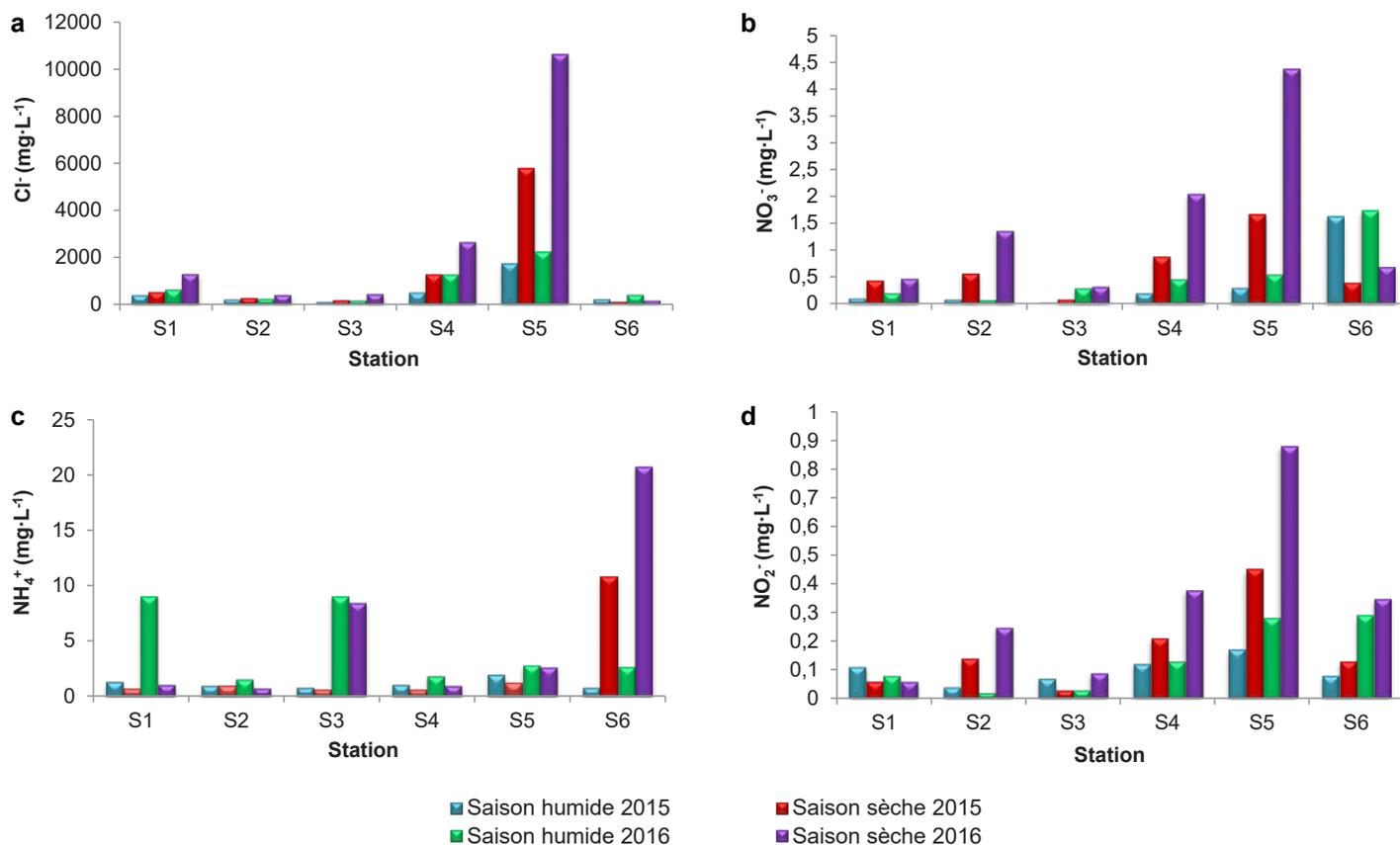


Figure 4. Variation des concentrations en ion chlorure et en azote minéral dans les eaux superficielles du lac Fetzara : a) Cl^- , b) NO_3^- , c) NH_4^+ , d) NO_2^- .
Variation in chloride ion and mineral nitrogen concentrations in the surface waters of Lake Fetzara: a) Cl^- , b) NO_3^- , c) NH_4^+ , d) NO_2^- .

nette pendant l'année 2016. Les fortes concentrations sont observées dans les stations 4 et 5 (Figure 4d) en saison sèche. Ces stations sont situées dans la partie centrale du lac. Celle-ci recevant toutes les eaux collectées du bassin versant du lac Fetzara est la plus exposée à l'évaporation. En période estivale, les teneurs en cet ion sont plus fortes. Comme pour les ions nitrate, cette augmentation serait liée au phénomène d'évaporation et à la forte nitrification pendant cette période (FUSTEC et LEFEUVRE, 2000). Par rapport à ce critère de qualité, l'ensemble des eaux de la zone humide du lac Fetzara se situe dans les catégories de pollution modérée à notable (ANRH, 2009).

3.2 Analyse en composantes principales des paramètres mesurés

Dans le but d'établir une relation entre les différents paramètres physicochimiques des eaux et pour ressortir les différentes stations qui possèdent des concentrations élevées en azote minéral, un traitement statistique ACP (analyse en composantes principales) a été appliqué à l'ensemble des paramètres en période humide et en période sèche. Cette ACP est effectuée sur une matrice de données constituée de six prélèvements (stations) en saison humide et en saison

sèche, pour lesquels huit variables (la température, le pH, la conductivité électrique, l'oxygène dissous, l'ion nitrate, l'ion nitrite, l'ion ammonium et l'ion chlorure) ont été mesurées.

3.2.1 Saison humide

Le cercle de corrélation formé par les axes F1 et F2 (Figure 5a) donne 73,3 % de l'information totale. L'axe F1 (50,2 %) est principalement lié à la température, à l'ion nitrite, à l'oxygène dissous, à l'ion chlorure et à la conductivité électrique. Cet axe définit alors un gradient de minéralisation et de pollution. Aussi, cet axe représente l'influence du climat sur la qualité physicochimique des eaux du lac Fetzara. L'axe F2 (23,1 %) est corrélé positivement à l'ion ammonium et négativement au pH. Cet axe définit alors un gradient de pollution principalement dû à l'ammonification des substances azotées. En ce qui concerne la représentation des stations (Figure 5b) dans les axes, l'axe F1 indique l'existence de trois groupes assez distincts : le premier est composé de la station 5, le second est constitué des stations 2, 4, et 6 et le troisième est formé par les deux stations 1 et 3. Les paramètres qui ont créé cette hétérogénéité sont la température, l'ion nitrite, l'ion chlorure, l'oxygène dissous et la conductivité électrique. Cela signifie que le premier groupe est caractérisé par les

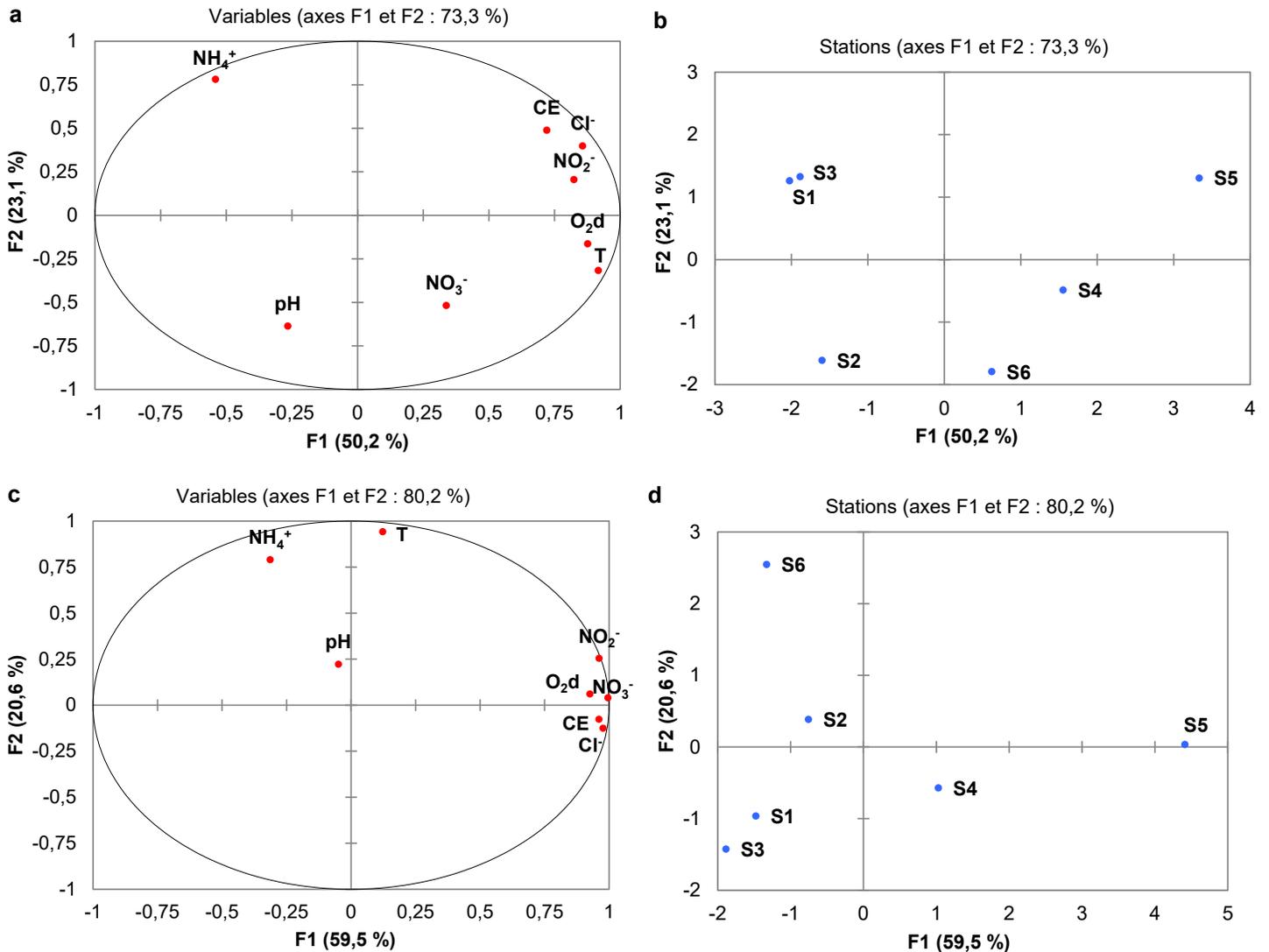


Figure 5. Analyse en composantes principales : a) cercle F1F2 en saison humide, b) plan des individus F1F2 en saison humide, c) cercle F1F2 en saison sèche, d) plan des individus F1F2 en saison sèche.
Principal component analysis: a) circle F1F2 in the wet season, b) plan of individuals F1F2 in the wet season, c) circle F1F2 in the dry season, d) plan of individuals F1F2 in the dry season.

valeurs les plus élevées de ces paramètres en opposition du troisième groupe. Le deuxième groupe contient des valeurs intermédiaires dans l'ensemble des paramètres responsables de cette variabilité. L'axe F2 témoigne de l'existence de trois groupes assez distincts : le premier est composé des stations 1 et 3, le deuxième est constitué par la station 5 et le troisième est formé par les stations 2, 4 et 6. Les paramètres responsables de cette variabilité sont l'ion ammonium et le pH. Cela signifie alors que le premier groupe est caractérisé par les valeurs les plus importantes en ion ammonium et les valeurs les plus faibles en pH et au contraire du troisième groupe. Le deuxième groupe contient des valeurs intermédiaires dans l'ensemble des paramètres responsables de cette variabilité.

3.2.2 Saison sèche

Le cercle de corrélation formé par les axes F1 et F2 (Figure 5c) donne 80,2 % de l'information totale. L'axe F1 (59,7 %) est principalement lié à la conductivité électrique, à l'ion chlorure, à l'oxygène dissous, à l'ion nitrate et à l'ion nitrite. Cet axe définit alors un gradient de minéralisation due à l'apport salifère du lac Fetzara et de pollution organique d'origine agricole. L'axe F2 (20,6 %) quant à lui, est associé à la température et à l'ion ammonium. En ce qui concerne la représentation des stations (Figure 5d) dans les axes, l'axe F1 indique l'existence de trois groupes assez distincts : le premier est composé par les stations 4 et 5, le deuxième est constitué par les stations 2 et 6 et le troisième est formé par les stations 1 et 3. Les paramètres qui ont créé cette hétérogénéité sont la conductivité électrique, l'ion chlorure, l'ion nitrite, l'ion nitrate et l'oxygène

dissous. Cela signifie que le premier groupe est caractérisé par les valeurs les plus élevées en ces paramètres en opposition du troisième groupe. Le deuxième groupe contient des valeurs intermédiaires dans l'ensemble des paramètres responsables de cette variabilité. L'axe F2 témoigne de l'existence de trois groupes assez distincts : le premier est composé par la station 6, le second est constitué par les deux stations 1 et 3 et le troisième est formé par les stations 2, 4 et 5. Les paramètres responsables de cette variabilité sont la température et l'ion ammonium. Cela signifie que le premier groupe est caractérisé par les valeurs les plus élevées en température et en ion ammonium et au contraire du troisième groupe. Le deuxième groupe contient des valeurs intermédiaires dans l'ensemble des paramètres responsables de cette variabilité.

3.3 Test *t* de Student

L'analyse des résultats du test *t* de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en saison humide et en saison sèche (Tableau 2) montre qu'il existe des différences très hautement significatives entre les deux saisons pour uniquement la température. Pour les autres paramètres, il n'existe aucune différence significative.

4. CONCLUSION

Cette étude à été menée sur l'évaluation de la pollution azotée minérale des eaux superficielles de la zone humide du lac Fetzara. Par une approche physicochimique spatiotemporelle, les résultats de l'analyse des eaux ont permis de distinguer les stations qui possèdent les plus fortes concentrations en azote minéral. Ces stations sont divisées en deux classes assez distinctes : la plus riche en ions nitrate et en ions nitrite, correspondant aux stations 4 et 5 situées dans la partie centrale du lac recevant toutes les eaux collectées (lessivage des sols cultivés et d'unités d'élevage d'animaux). Celles qui sont les plus riches en ions ammonium sont les stations 3 et 6 (respectivement oued Mellah et oued Zied) qui sont uniquement alimentées en eaux résiduelles urbaines. Les concentrations en azote minéral deviennent considérablement fortes au cours de l'année 2016. Cette étude indique aussi que les eaux de la zone humide du lac Fetzara, très chargées en ions ammonium et parfois en ions nitrite d'origines urbaine et agricole est un indice révélateur de sa pollution potentielle par des substances organiques. D'autres études s'intéressant à ce type de pollution s'imposent alors pour évaluer son impact sur la biodiversité de cette zone humide et sur la qualité des eaux souterraines adjacentes.

Tableau 2. Test *t* de Student pour les paramètres mesurés en saisons humide et sèche.
Table 2. Student's *t*-test for measured parameters in wet and dry seasons.

Paramètre	Moyenne		t_{obs}^a	<i>P</i>
	Saison humide	Saison sèche		
Température (°C)	14,93	24,747	9,34	0,000*** ^b
pH	8,405	8,030	2,18	0,057 NS ^c
Conductivité électrique ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	2050	2918	0,53	0,615 NS
Oxygène dissous ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	6,01	3,83	1,64	0,146 NS
Cl^- ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	691	2007	1,01	0,359 NS
NO_3^- ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0,467	1,111	1,30	0,230 NS
NO_2^- ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0,108	0,250	1,47	0,193 NS
NH_4^+ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	2,80	4,11	0,52	0,624 NS

^a Valeur observée de la variable *t* de Student

^b Différence très hautement significative

^c Différence non significative

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGENCE JAPONAISE DE COOPÉRATION INTERNATIONALE (AJCI) (1985). *Étude de faisabilité du projet d'aménagement agricole de la région périphérique du lac Fetzara*. AJCI, Japon, 56 p.
- AGENCE NATIONALE DES RESSOURCES HYDRAULIQUES (ANRH) (2009). *Surveillance de la qualité des eaux*. ANRH, Algérie, 26 p.
- BERNAUD G. et E. FUSTEC (2007). *Conserver les zones humides : pourquoi ? comment ?* Éditions Quae, Educagri éditions, France, 271 p.
- BORDET J. (2007). *L'eau dans son environnement rural*. Editions Johanet, Paris, France, 318 p.
- BOUGHERIRA N. et B. AOUN-SEBAITI (2012). Impact des rejets urbains et industriels sur l'eau superficielle et souterraine dans la plaine d'Annaba, Algérie. *Courrier du Savoir*, 13, 63-69.
- BOU SAAB H., N. NASSIF, A.G. EL SAMRANI, R. DAOUD, S. MEDAWAR et N. OUAINI (2007). Suivi de la qualité bactériologique des eaux de surface (rivière Nahr Ibrahim, Liban). *J. Water Sci.*, 20, 341-352.
- BRAHIMI A. et A. CHAFI (2014). Étude écotoxicologique de l'oued Za et de son affluent oued Tizeghrane (Basse Moulouya, Maroc Oriental). *J. Mater. Environ. Sci.*, 5, 1671-1682.
- CHAPMAN D. et V. KIMSTACH (1996). Selection of water quality variables. Dans : *Water quality assessments. A guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring*. CHAPMAN D. (éd.), UNESCO, WHO, UNEP, University Press, Cambridge, Royaume-Uni, pp. 74-133.
- DIRECTION GÉNÉRALE DES FORÊTS (DGF) (2003). *Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar, lac Fetzara, wilaya d'Annaba*. DGF, Algérie, 6 p.
- DJAMAI R. (2007). *Contribution à l'étude de la salinité des sols et des eaux du système endoréique du lac Fetzara (Nord-Est algérien). Approche géochimique et évolution spatio-temporelle des phénomènes*. Thèse de doctorat, Institut national agronomique d'Alger, Algérie, 177 p.
- DJAMAI R., D. FADEL, A. LAIFA, M. BENSLAMA, Y. DAOUD et V. VALLES (2011). Concept d'alcalinité résiduelle et évolution géochimique des processus. Application aux sols salés du lac Fetzara, Nord-Est algérien. *Synthèse : Rev. Sci. Tech.*, 23, 90-97.
- DORE M. (1989). *Chimie des oxydants et traitement des eaux*. Technique et documentation, Lavoisier, France, 494 p.
- DROUART E. et J. VOUILLAMOZ (1999). *Alimentation en eau des populations menacées*. Harmann, Paris, France, 565 p.
- FEKRACHE F. (2014). *Contribution à l'étude de l'origine de la salinité des eaux du lac Fetzara*. Thèse de doctorat. Univ. Badji Mokhtar Annaba, Algérie, 151 p.
- FEKRACHE F. (2018). The quality groundwater for irrigation en Fetzara bassin, northeast Algeria. *J. Bio. Env. Sci.*, 12, 52-62.
- FUSTEC E. et J.C. LEFEUVRE (2000). *Fonctions et valeurs des zones humides*. Dunod, Paris, France, 423 p.
- GHI (2009). *Étude d'avant projet détaillée pour l'aménagement intégré portant sur la protection des localités à l'aval du lac et les terres agricoles à la périphérie du lac Fetzara contre les inondations, Wilaya d'Annaba*. Étude hydrologique, Bureau d'études espagnol, 115 p.
- GOUASMIA G., M. AMAROUAYACHE, H. FRIHI et M.H. KARA (2016). Caractérisation physico-chimique de trois lacs salés permanents de la vallée d'oued Righ (Sahara septentrional, Algérie nord-est). *Rev. Ecol.*, 71, 330-341.
- HABES S. (2013). *Caractéristiques chimiques d'un lac appartenant aux écosystèmes humides du nord de l'Algérie-Cas du lac Fetzara Nord-Est*. Thèse de doctorat. Univ. Badji Mokhtar Annaba, Algérie, 218 p.
- HÉBERT S. et S. LÉGARÉ (2000). *Suivi de la qualité de l'eau des rivières et petits cours d'eau*. Direction de suivi de l'état de l'environnement, Ministère de l'Environnement, Envirodoq N° ENV-2001-0141, rapport N° QE-123, Québec, Canada, 48 p.
- JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE (JORA) (2011). Conventions et accords internationaux. Lois et décrets arrêtés, décisions, avis, communications et annonces. *JORA*, 13, 1-24.

- KHELFAOUI H., H. CHAFFAI, A. HANI et R. LAOUAR (2012). Impacts des rejets industriels sur la région de Berrahal (Nord-Est algérien). *Synthèse : Rev. Sci. Tech.*, 25, 71-81.
- KOTCHI R., G. SORO, D.T. SORO, R.M. FOUSSO, O.Z. ONITIE, E.K. AHOUSSE et N. SORO (2016). Variation saisonnière de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des aquifères d'Altérites du département d'Agboville (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *Eur. Sci. J.*, 12, 213-240.
- LACAZE J.C. (1996). *L'eutrophisation des eaux marines et continentales*. Ellipses, France, 191 p.
- MAKHOUKH M., M. SBAA, A. BERRAHOU et M. VAN-CLOOSTER (2011). Contribution à l'étude physico-chimique des eaux superficielles de l'oued Moulouya (Maroc oriental). *Larhyss J.*, 9, 149-169.
- MERGHEM K.A., H. ELHALOUANI, A.A. ALNEDHARY, K. DSSOULI, E. GHARIBI, R.Q. ALANSI et F. ALNAHMI (2016). Étude de l'impact des rejets d'eaux usées brutes et épurées sur la qualité de l'Oued Bani Houat (Bassin de Sanaa) : Étude spatio-temporelle. *J. Mater. Environ. Sci.*, 7, 1516-1530.
- MONTUELLE B. (2003). *Qualité et gestion des sédiments d'eau douce*. Éléments physico-chimiques et biologiques. Cemagref, Lyon, France, 291 p.
- OUHMIDOU M., A. CHHLAOUI, A. KHARROUBI et M. CHAHBOUNE (2015). Étude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux du barrage Hassan Addakhil d'Errachidia (Maroc). *J. Mater. Environ. Sci.*, 6, 1663-1671.
- RODIER J. (1978). *L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer*. Dunod, Paris, France, 1526 p.
- RODIER J., B. LEGUBE et N. MERLET (2009). *L'analyse de l'eau*. Dunod, Paris, France, 1579 p.
- ROUABHIA A., L. DJABRI, R. HADJI, F. BAALI, C. FEHDI et A. HANI (2012). Geochemical characterization of groundwater from shallow aquifer surrounding Fetzara Lake N. E. Algeria. *Arab. J. Geosci.*, 5, 1-13.
- ROUYRRE C. (2003). *Guide de l'eau. Comment moins la polluer ? Comment la préserver ?* Seuil, France, 154 p.
- SAVARY P. (2010). *Guide des analyses de la qualité de l'eau*. Groupe Territorial, France, 266 p.
- SIGG L., P. BEHRA et W. STUMM (2006). *Chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement*. Dunod, Paris, France, 549 p.
- VILAGINÈS R. (2000). *Eaux, environnement et santé publique*. Technique et documentation, Lavoisier, France, 173 p.
- ZAHY F. (2014). *Contribution à l'étude hydrochimique du sous bassin versant du lac Fetzara (nord-est Algérien), approche géochimique et fonctionnement des sols et des eaux*. Thèse de doctorat, Univ. Badji Mokhtar Annaba, Algérie, 193 p.
- ZAHY F., R. DJAMAI, S. CHAAB, L. DJABRI, A. DROUCHE et F. MEDJANI (2013). Dynamique de la nappe et qualités physico-chimiques des eaux souterraines du lac Fetzara, Nord-Est algérien. *Synthèse : Rev. Sci. Tech.*, 26, 86-95.