

Article

« Bilans hydrologiques de la lagune de Bizerte (nord-est de la Tunisie) »

Amor Ben Garali, Mohamed Ouakad et Moncef Gueddari

Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 22, n° 4, 2009, p. 525-534.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/038329ar>

DOI: 10.7202/038329ar

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter à l'URI <https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : info@erudit.org

BILANS HYDROLOGIQUES DE LA LAGUNE DE BIZERTE (NORD-EST DE LA TUNISIE)

Hydrologic budget of the lagoon of Bizerte (Northeastern Tunisia)

AMOR BEN GARALI*, MOHAMED OUAHAD¹ et MONCEF GUEDDAR²

¹Faculté des Sciences de Bizerte, Laboratoire de sédimentologie et géochimie marine,
7021 Zarzouna, Bizerte, Tunisie.

²Faculté des Sciences de Tunis, Université El Manar, 1060 Tunis, Tunisie

Reçu le 28 avril 2008, accepté le 27 janvier 2009

RÉSUMÉ

Les flux liquides et solides (écoulés à partir des principaux tributaires de la lagune de Bizerte), corrélés positivement, sont influencés par les conditions environnementales et par les aménagements hydrauliques en amont. C'est dans ce contexte que nous présentons cette étude qui consiste à présenter un bilan d'évolution mensuel des flux liquides, solides et en composants azotés et phosphatés dissous dans les eaux des principaux affluents de la lagune de Bizerte au cours de l'année hydrologique (octobre 2004 - septembre 2005). L'utilisation fréquente et intensive par les agriculteurs d'engrais chimiques azotés et phosphatés, d'une part, et le déversement d'eaux usées domestiques et industrielles dans les principaux tributaires de la lagune, d'autre part, participent activement à la pollution des eaux de la lagune. Cette dernière est liée à la garaet Ichkeul par l'intermédiaire de l'oued Tinja. En hiver, les eaux circulent de la garaet Ichkeul vers la lagune de Bizerte, avec des flux liquides et solides respectivement estimés à $418 (\pm 28) \text{ Mm}^3$ et $(28 \pm 5) \times 10^3 \text{ (t)}$. Ainsi, l'oued Tinja représente la principale source d'apports en éléments nutritifs à la lagune de Bizerte ($74 (\pm 15)$, $954 (\pm 76)$, $92 (\pm 11)$ et $70 (\pm 11) \text{ (t)}$ respectivement de nitrite, nitrate, ammonium et phosphate),

alors que durant la période sèche, cet oued permet aux eaux marines ($8 (\pm 2) \text{ Mm}^3$) de pénétrer dans la garaet Ichkeul à travers la lagune de Bizerte.

Mots clés : *Lagune de Bizerte, bilan hydrique, flux de matière, nutriments, pollution.*

ABSTRACT

The water and solid fluxes (drained from the principal tributaries of the Bizerte Lagoon) were positively correlated and were influenced by the environmental conditions and by the upstream hydraulic installations. It is within this context that we present this study on the monthly variation of water, solid and dissolved nutrient fluxes associated with the principal tributaries of the Bizerte Lagoon during the October 2004 – September 2005 hydrologic year. The frequent and intensive use of chemical nitrogenous and phosphate fertilizer by farmers, on one hand, and the discharge of domestic sewage and industrial wastewater to the principal tributaries of this

*Auteur pour correspondance :

Téléphone: 216 72 591 906

Télécopieur : 216 72 590 566

Courriel : lgamor@yahoo.fr

lagoon, on the other hand, actively contribute to the pollution of the lagoon waters. The Bizerte Lagoon is linked to the garaet Ichkeul by the Tinja wadi. In winter, waters flow from garaet Ichkeul towards the Bizerte Lagoon, and the water and solid fluxes are estimated to be $418 \pm 29 \text{ Mm}^3$ and $(28 \pm 5) \times 10^3 \text{ (t)}$, respectively. Thus, the Tinja wadi represents the main nutrient supply to the Bizerte Lagoon: 75 ± 15 ; 954 ± 76 ; 92 ± 11 ; and $70 \pm 11 \text{ (t)}$ for nitrite, nitrate, ammonium and phosphate, respectively. In contrast, during the dry period, this wadi allows marine waters ($84 \pm 2.5 \text{ Mm}^3$) to penetrate in the garaet Ichkeul through the Bizerte Lagoon.

Key words: *Bizerte Lagoon, hydrologic budget, solid fluxes, nutrients, pollution.*

1. INTRODUCTION

La lagune de Bizerte (Tunisie septentrionale) représente un écosystème à diversité biologique importante, et de ce fait, elle fut exploitée depuis la fin du siècle dernier comme milieu d'élevage aquacole, en particulier des huîtres. Cependant, de nos jours, on assiste à une altération progressive des caractères physico-chimiques liés à l'augmentation des apports en nutriments des eaux à la lagune qui serait responsable de la régression de la diversité biologique et de la production halieutique. L'importance de ces apports en nutriments azotés et phosphatés inorganiques dissous dans les eaux de la plupart des oueds se déversant dans la lagune est liée aux conditions hydroclimatiques et aux aménagements hydroagricoles du bassin versant de la lagune. La région de Bizerte bénéficie d'un climat sub-humide, dont la pluviométrie annuelle oscille entre 600 et 800 mm. Deux saisons sont à distinguer, une saison hivernale (période d'échantillonnage) allant de novembre à avril, avec un maximum de précipitation au mois de février (220 mm) et une saison estivale (sèche), par conséquent sans écoulement des oueds, durant le reste de l'année. Le réseau hydrographique qui participe à l'alimentation de la lagune est assez bien développé et draine un bassin versant dont la superficie totale est de l'ordre de 252 km^2 (KALLEL, 1979 dans SOUSSI, 1981).

L'importance des apports en eau à la lagune de Bizerte est fonction, d'une part, de la pluviométrie et, d'autre part, de la surface et du coefficient de ruissellement du bassin versant de chaque oued. Dans le bilan hydrologique de la lagune de Bizerte, l'oued Tinja, exutoire naturel du bassin versant de la garaet Ichkeul ($2\,080 \text{ km}^2$ de superficie) (KALLEL, 1989), joue un rôle prépondérant, surtout hivernal, avec un débit annuel d'évacuation à la lagune de l'ordre de 438 Mm^3 (CHAUMONT, 1956).

Plusieurs aménagements hydrauliques (barrages et lacs collinaires) ont été réalisés à l'amont, au niveau des bassins versants de la garaet Ichkeul et de la lagune de Bizerte, ce qui a conduit à des modifications majeures concernant les apports liquides et solides vers la lagune. C'est dans ce contexte que cette étude a été réalisée afin de caractériser et de quantifier les apports annuels liquides, solides et en nutriments dissous se déversant dans la lagune, ce qui nous permet d'établir un bilan hydrologique actuel de la lagune de Bizerte.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Site d'étude

La lagune de Bizerte est une lagune côtière de forme elliptique, située au nord-est de la Tunisie, entre $37^\circ 8'$ et $37^\circ 14'$ de latitude Nord et $9^\circ 46'$ et $9^\circ 56'$ de longitude Est. Elle présente une double communication, d'une part avec la mer Méditerranée par un chenal de 7 km de longueur, 300 m de largeur et 13 m de profondeur, et avec la garaet Ichkeul par l'intermédiaire de l'oued Tinja, d'autre part. En hiver, un surplus d'eau douce est évacué de la garaet Ichkeul vers la lagune de Bizerte via l'oued Tinja, alors que durant la période sèche, cet oued permet aux eaux marines de pénétrer dans la garaet Ichkeul à travers la lagune de Bizerte.

L'alimentation hydrique de la lagune de Bizerte s'effectue à partir de plusieurs sources (présentées sur la Figure 1), en particulier par :

- ruissellement des différents cours d'eau qui drainent le bassin versant de la lagune. Il s'agit des oueds Haima, Ben Hassine, Rharek et Guenniche;
- apports à partir de la garaet el Ichkeul (avec un bassin versant très important de $2\,080 \text{ km}^2$ de superficie) à travers l'oued Tinja, durant la saison hivernale (Figure 2A).
- les précipitations directes sur ce plan d'eau.

La figure 2B montre les différents sous-bassins versants associés à la lagune de Bizerte. Il s'agit de 12 sous-bassins dont les plus importants sont ceux qui font l'objet du présent travail (Haima, Tinja, Ben Hassine, Rharek et Guenniche).

Le tableau 1 montre que la majorité des sols est occupée par des cultures, ensuite les oliviers et les sols nus, et enfin les forêts. L'activité agricole dans cette région bénéficie de conditions climatiques très favorables. Les terres agricoles autour de la lagune occupent une superficie de $12\,700$ hectares comprenant essentiellement les grandes cultures ($7\,800 \text{ ha}$), les cultures maraîchères ($3\,400 \text{ ha}$) et les arboricultures (500 ha) (MANSOURI, 1996).

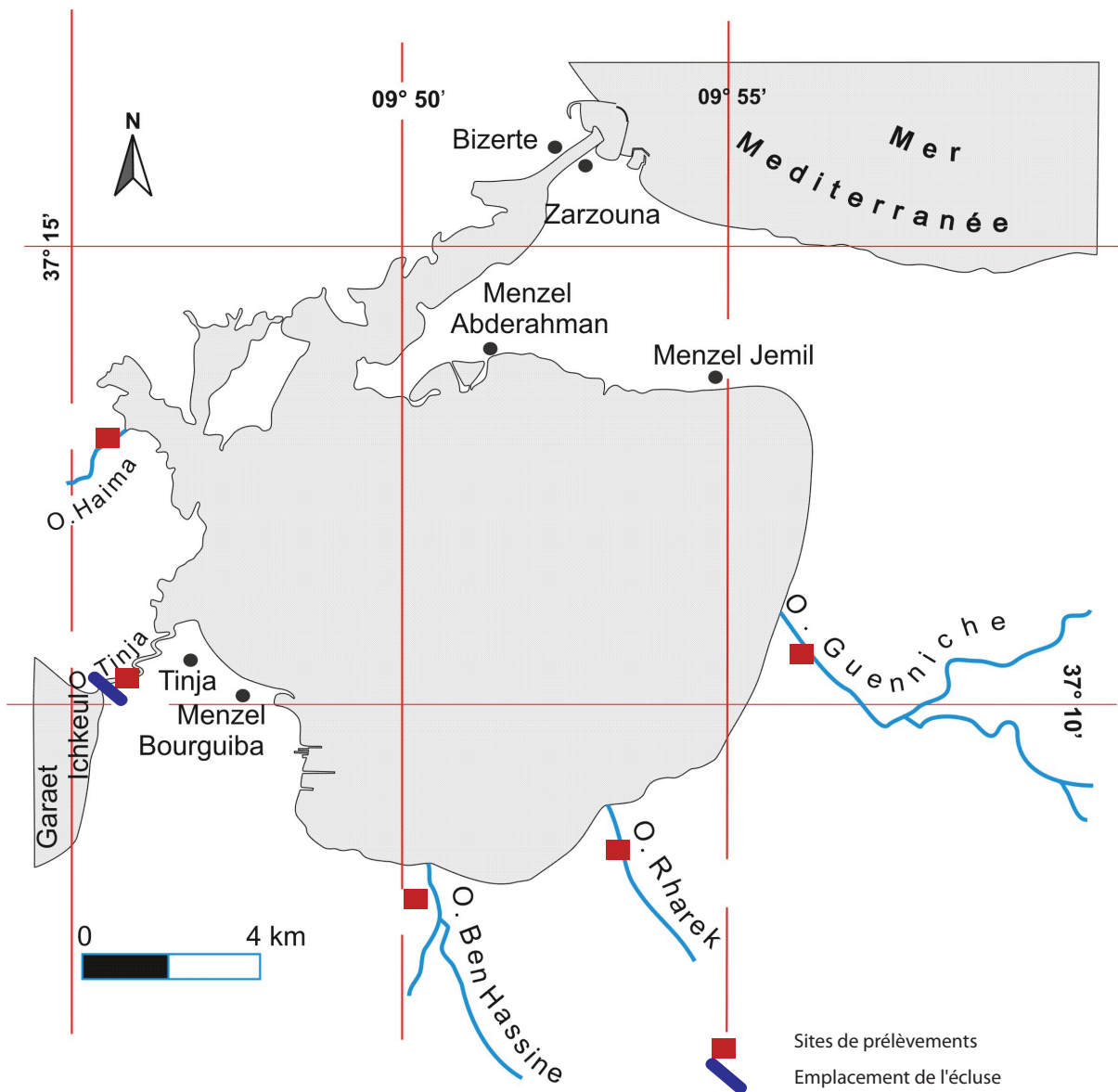


Figure 1. Localisation des sites de prélèvement au niveau des affluents de la lagune de Bizerte.
Sampling locations in the tributaries of the lagoon of Bizerte.

2.2 Échantillonnages et analyses

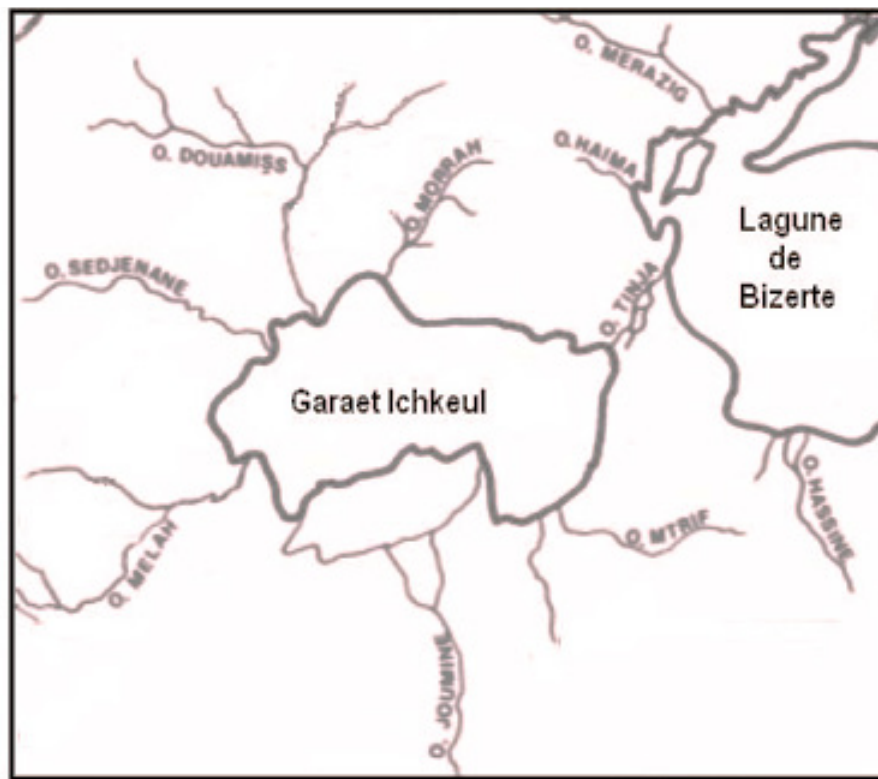
Des campagnes mensuelles ont été effectuées au niveau des lits des cinq principaux cours d'eaux se déversant dans la lagune de Bizerte (Figure 1). Une quantité suffisante d'eau (250 mL) est ainsi prélevée pour le dosage des éléments nutritifs (nitrite, nitrate, ammonium et phosphate) en utilisant la méthode d'AMINOT et CHAUSSEPIED (1983). De même, 2 000 mL d'eau ont été prélevés et filtrés sur des filtres Millipore (45 μm) pour la détermination de la matière en suspension (MES). Les campagnes d'échantillonnage ne sont réalisées que durant la saison pluvieuse allant de novembre à avril, période à fort écoulement, afin d'obtenir des mesures représentatives des conditions moyennes mensuelles. Le reste de l'année est

considéré comme saison sèche sans écoulement des oueds, ce qui est la cause du non-échantillonnage.

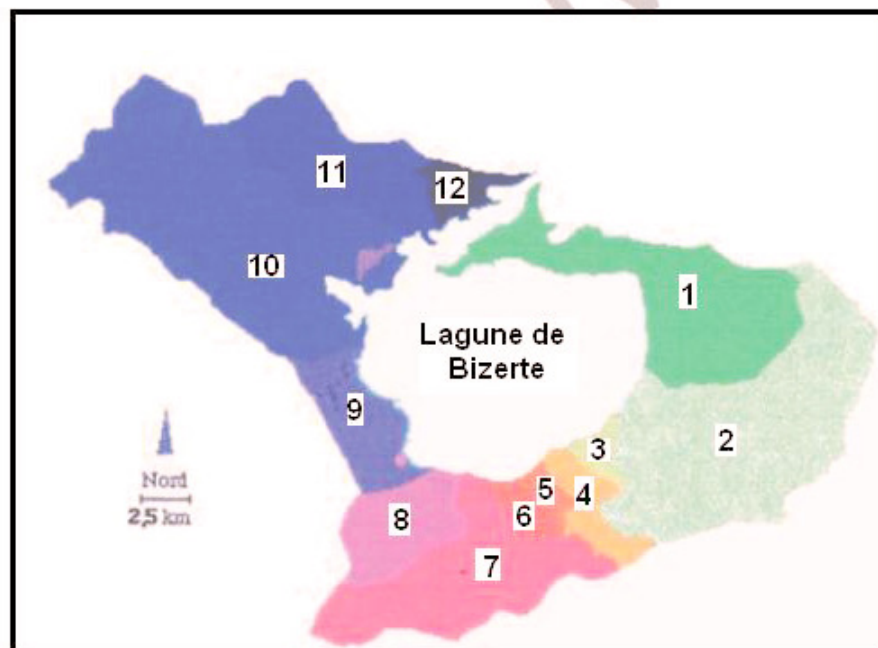
2.3 Quantification des apports

2.3.1 Cas de l'oued Tinja (OT)

Suite à la construction de l'écluse sur l'oued Tinja (Figure 1), et en l'absence de nouvelles courbes de tarage, le flux liquide (en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) est déterminé par la relation établie par HOLLIS (1983) dans CHAOUACHI *et al.* (1996), qui tient compte de la hauteur de l'eau dans l'oued (H exprimée en cm, mesurée



(A)



(B)

Légendes : El Guela (1), Guenniche (2), Chegui, Tliba (3), Rharek (4), Sidi Mbarek, Gouraya (5), Elhathat, Ain Hlalif (6), Ben Hassine (7), Guennine (8), Tinja (9), Haima (10), Mrazig (11), Abess et Merj (12).

Figure 2. (A) Bassin versant associé à la garaet Ichkeul, (B) Carte des périmètres des sous-bassins versants de la lagune de Bizerte (MANSOURI, 1996).

(A) Catchment related to garaet Ichkeul, (B) map delimiting the individual catchments of the lagoon of Bizerte (MANSOURI, 1996).

Tableau 1. Propriétés et occupation des sols des bassins versants des oueds associés à la lagune de Bizerte.
Table 1. Properties and land use in the catchment of the wadis related to the lagoon of Bizerte.

Oueds	Superficie (km ²)	Culture (%)	Olive (%)	Nus (%)	Forêt (%)	Population	Coefficient de ruissellement (%)
OT	2 080	55	35	5	5	Forte	-
OH	104	70	20	10	0	Faible	20
OBH	45	60	30	10	0	Faible	12
OR	8	40	40	10	10	Faible	12
OG	66,5	50	40	5	5	Forte	08

chaque jour) en période de courant sortant du garaet Ichkeul vers la lagune de Bizerte :

$$\text{Si } 47 \text{ cm} < H < 96 \text{ cm} : Q = 0,588 H - 27, 94$$

$$\text{Si } H > 96 \text{ cm} : Q = 0,302 H - 0, 49$$

H: hauteur d'eau journalière (une moyenne mensuelle est utilisée pour le calcul).

Q : flux liquide journalier déduit en m³•s⁻¹.

Le flux liquide mensuel (en m³ ou L) est donc :

$$Q_{lm} = Q \times 24 \times 3\ 600 \times 30$$

Ainsi, on est en mesure de quantifier les flux mensuels, solides et en éléments nutritifs (en « t ») déversés dans la lagune de Bizerte, exprimés selon la relation suivante :

$$Q_i = C_i \times Q_{lm}$$

avec

Q_i : flux mensuel en MES, nitrite, nitrate, ammonium ou phosphate;

C_i : concentration en MES, nitrite, nitrate, ammonium ou phosphate (en mg•L⁻¹);

Q_{lm} : flux liquide mensuel.

2.3.2 Cas des oueds Haima (OH), Ben Hassine (OBH), Rharek (OR) et Gueniche (OG)

En période de crue, l'accessibilité aux différents oueds considérés demeure très difficile. Aucune mesure du débit n'a été réalisée et l'absence de toutes courbes de targe nous a conduits à procéder à un essai de quantification des apports mensuels solides et liquides à l'aide des formules empiriques permettant de déterminer le volume moyen mensuel ruisselé associé à chacun des bassins versants des oueds considérés (KALLEL, 1989). Le calcul du volume d'eau mensuel ruisselé s'effectue de la façon suivante :

$$L_{mr} = P_m \times C_r$$

avec

L_{mr} : lame d'eau mensuelle ruisselée (mm);

P_m : pluviométrie mensuelle (mm) (INM, 2006);

C_r : coefficient de ruissellement (%) (KALLEL, 1989).

Le coefficient de ruissellement est déterminé par la formule suivante :

$$C_r = r/P,$$

avec r : ruissellement moyen (mm) et P : pluviométrie annuelle (mm).

Sachant que V_{mr} = L_{mr} x S

avec

V_{mr} : volume d'eau mensuel ruisselé (m³);

L_{mr} : lame d'eau mensuelle ruisselée (mm);

S : superficie du bassin versant (km²) (KALLEL, 1989).

Ainsi, on détermine les flux mensuels solides et en éléments nutritifs comme suit :

$$Q_i = V_{mr} \times C_i$$

avec

Q_i : quantité de l'élément en (t);

V_{mr} : volume d'eau mensuel ruisselé (L);

C_i : concentration de l'élément i (MES, nitrite, nitrate, ammonium ou phosphate) en mg•L⁻¹.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Quantité et qualité des apports

Les apports liquides et solides des cinq oueds associés au bassin versant de la lagune de Bizerte varient dans le même sens, surtout durant la période du maximum de précipitation. Ces apports fluctuant d'un mois à l'autre sont, en conséquence, dépendants des conditions hydroclimatiques. L'oued Tinja (OT)

Tableau 2. Comparaisons des apports liquides, solides et en éléments nutritifs annuels entre l'oued Tinja et les autres affluents de la lagune de Bizerte.

Table 2. Comparison of annual supplies of water, solids and nutrients flowing from wadi Tinja and other tributaries of the lagoon of Bizerte.

Oueds	OH	OG	OR	OBH	TOTAL	OT
<i>Eau (Mm³)</i>	16,48 (±1,21)	4,21 (±0,31)	0,66 (±0,076)	4,27 (±0,31)	25,62 (±1,90)	418 (±28,64)
<i>MES (10³t)</i>	1,7 (±0,28)	0,14 (±0,016)	1,46 (±0,32)	0,66 (±0,094)	3,97 (±0,61)	28 (±4,99)
<i>NO₂⁻ (t)</i>	2,99 (±0,47)	1,06 (±0,14)	0,12 (±0,017)	0,98 (±0,14)	5,15 (±0,76)	74,56 (±15,12)
<i>NO₃⁻ (t)</i>	31,9 (±3,38)	10,19 (±0,81)	1,16 (±0,14)	9,75 (±0,83)	43,25 (±5,16)	954,4 (±76,01)
<i>NH₄⁺ (t)</i>	2,72 (±0,48)	1,05 (±0,19)	0,10 (±0,019)	0,96 (±0,11)	4,83 (±0,79)	92,1 (±10,50)
<i>PO₄³⁻ (t)</i>	3,08 (±0,51)	1,07 (±0,18)	0,13 (±0,03)	0,49 (±0,072)	4,77 (±0,79)	69,7 (±10,94)

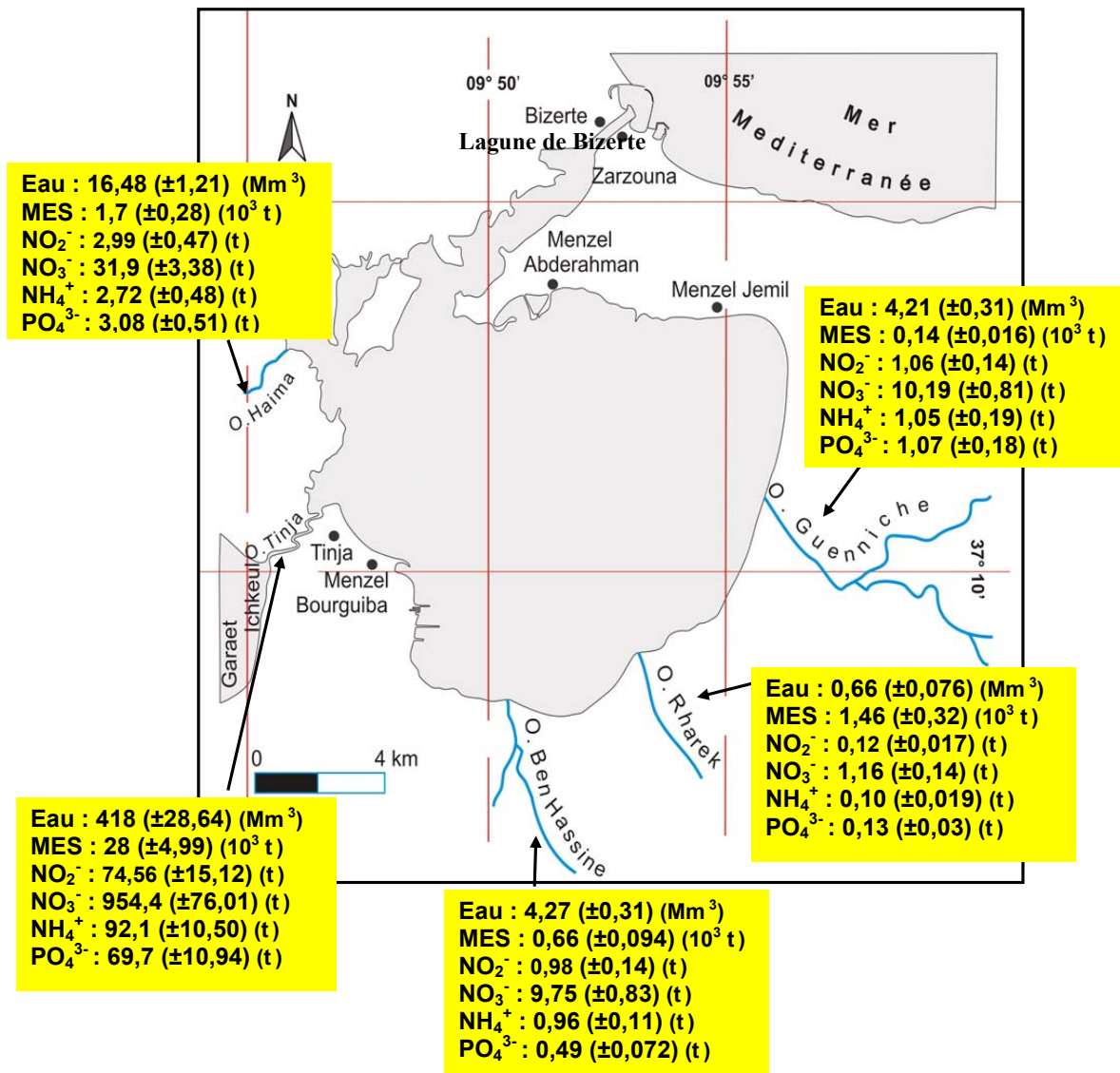


Figure 3. Apports liquides (Mm³), solides (10³ t) et en éléments nutritifs (t) annuels des principaux affluents de la lagune de Bizerte.

Water (Mm³), solid (10³ t) and nutrient (t) yearly supplies to the lagoon of Bizerte.

montre des apports liquides et solides annuels très importants, respectivement $418 (\pm 28) \text{ Mm}^3$ et $(28 \pm 5) \times 10^3 \text{ (t)}$. Ces apports sont loin d'être comparables avec ceux des autres affluents de la lagune de Bizerte (Tableau 2) (Figure 3).

Par conséquent, l'oued Tinja est considéré comme la principale source en ces éléments avec $74 (\pm 15)$, $954 (\pm 76)$, $92 (\pm 11)$ et $70 (\pm 11) \text{ (t)}$ respectivement en nitrite, nitrate, ammonium et en orthophosphate (Figure 4). Comme les alentours de la garaet Ichkeul ne présentent pas d'activités industrielles ni d'agglomérations importantes, ces apports sont le résultat d'une culture intensive nécessitant souvent des fertilisants à base d'azote mais aussi de phosphore qui sont entraînés par lessivage, drainage ou ruissellement.

L'importance des apports est fonction, d'une part, de la pluviométrie et, d'autre part, de la surface ainsi que du coefficient de ruissellement du bassin versant de chaque oued. L'oued Haima (OH), avec un bassin versant de 104 km^2 de superficie et un coefficient de ruissellement de 20 % (KALLEL, 1989), présente des apports liquides et solides annuels importants de respectivement $16,5 (\pm 1,2) \text{ Mm}^3$ et $(1,7 \pm 0,3) \times 10^3 \text{ (t)}$, $3 (\pm 0,5) \text{ (t)}$ de nitrite, $31,9 (\pm 3,4) \text{ (t)}$ de nitrate, $2,72 (\pm 0,48) \text{ (t)}$ d'ammonium et $3,08 (\pm 0,51) \text{ (t)}$ d'orthophosphate sont acheminés par cet oued vers la lagune de Bizerte.

L'oued Guenniche (OG), avec un bassin versant assez important d'environ $66,5 \text{ km}^2$ et un coefficient de ruissellement de 8 % (KALLEL, 1989), constitue une source majeure en éléments nutritifs. À savoir, $1,06 (\pm 0,14) \text{ (t)}$ de nitrite, $10,2 (\pm 0,8) \text{ (t)}$ de nitrate, $1,05 (\pm 0,19) \text{ (t)}$ d'ammonium et $1,07 (\pm 0,18) \text{ (t)}$ d'orthophosphate sont déversés dans la lagune de Bizerte. Les apports liquides et solides annuels sont respectivement $4,21 (\pm 0,31) \text{ Mm}^3$ et $(0,14 \pm 0,016) \times 10^3 \text{ (t)}$.

Cet oued est donc considéré comme pollué. Cette pollution paraît le résultat, outre des activités agronomiques intenses, de rejets d'élevage, mais aussi des rejets des eaux usées des agglomérations urbaines qui se concentrent aux voisinages de cet oued (El Alia, El Khetmine et Maghrawa) et qui sont, dans la majorité, non raccordées au réseau d'assainissement (DGEQV, 2003. BONTOUX (1983) précise que les eaux usées domestiques contiennent environ 60 % d'azote ammoniacal, 40 % d'azote organique et moins de 1 % d'azote nitrique et nitreux. Le reste des oueds, avec des teneurs légèrement élevées, sont à l'origine d'une activité de culture intense.

Avec un bassin versant plus ou moins étendu, d'environ 45 km^2 de superficie et un coefficient de ruissellement de 12 % (KALLEL, 1989), l'oued Ben Hassine (OBH) montre des apports liquides et solides annuels respectivement de l'ordre de $4,27 (\pm 0,31) \text{ Mm}^3$ et $(0,66 \pm 0,094) \times 10^3 \text{ (t)}$. Ces apports sont accompagnés par des débits importants en éléments nutritifs, ainsi, $0,98 (\pm 0,14) \text{ (t)}$ de nitrite, $9,75 (\pm 0,83) \text{ (t)}$ de nitrate, $0,96 (\pm 0,11) \text{ (t)}$ d'ammonium et $0,49 (\pm 0,072) \text{ (t)}$ d'orthophosphate sont évacués par cet oued vers la lagune de Bizerte.

L'oued Rharek (OR), avec un bassin versant restreint (8 km^2) et un coefficient de ruissellement de 12 % (KALLEL, 1989), montre un apport solide annuel très important $(1,46 \pm 0,32) \times 10^3 \text{ (t)}$ qui ne reflète pas les faibles apports liquides $(0,66 (\pm 0,076) \text{ Mm}^3)$, indiquant ainsi des eaux très turbides.

Ces eaux sont jugées une source mineure en éléments nutritifs, à savoir $0,12 (\pm 0,017) \text{ (t)}$ de nitrite, $1,16 (\pm 0,14) \text{ (t)}$ de nitrate, $0,10 (\pm 0,019) \text{ (t)}$ d'ammonium et $0,13 (\pm 0,030) \text{ (t)}$ d'orthophosphate sont déversés dans la lagune de Bizerte.

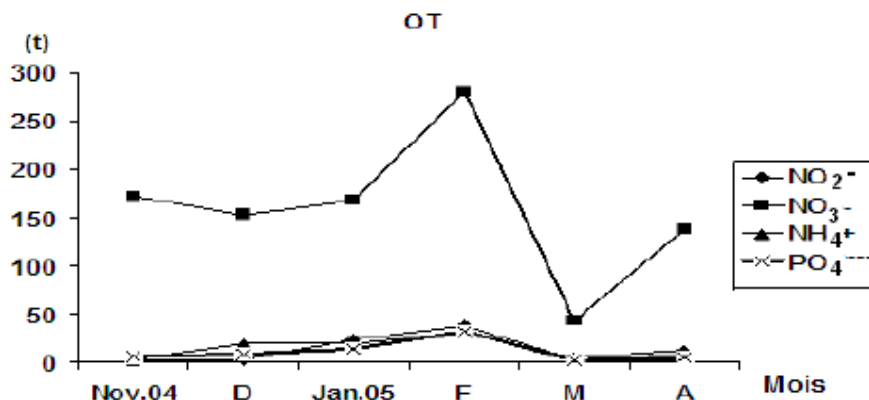


Figure 4. Variation mensuelle des apports en éléments nutritifs par l'oued Tinja.
Monthly variation of nutrient supply to the lagoon of Bizerte flowing from wadi Tinja.

Les nitrates sont les formes les plus stables de l'azote inorganique dissous, ce qui explique leurs concentrations élevées dans les eaux de ruissellement du bassin versant de la lagune de Bizerte; 31,9 ($\pm 3,4$) (t) de nitrates sont drainés par l'oued Haïma et déversés dans la lagune (Figure 3). De même, 954 ($\pm 76,1$) (t) de nitrates sont apportés par l'oued Tinja, exutoire naturel du bassin versant de la garaet Ichkeul (Figure 4).

Par comparaison aux données disponibles des travaux antérieurs (Tableau 3) concernant les apports liquides et solides au niveau de l'oued Tinja, nous avons enregistré des valeurs similaires pour les débits liquides, sauf qu'elles sont plus importantes que celles trouvées par CHAOUACHI *et al.* (1996), et qui peuvent être expliquées par la pluviométrie exceptionnelle de l'année hydrologique 2004-2005 (846 mm). Alors, les apports solides sont moins importants et sont le résultat des aménagements hydrauliques à l'amont des oueds du bassin versant de la garaet Ichkeul, ainsi que le phénomène du comblement du lit de l'oued Tinja par les sédiments de part et d'autre de l'écluse (Figure 1).

3.2 Bilans hydrologiques saisonniers

3.2.1 Durant la saison hivernale

Le bilan hydrologique de la lagune de Bizerte est sous influence saisonnière. Dans ces conditions, nous remarquons qu'en hiver les volumes sont les suivants : apports par précipitations directes 120 ($\pm 8,8$) Mm³, à partir de la garaet Ichkeul 418 (± 29) Mm³, apports du bassin versant 26

($\pm 1,9$) Mm³, évaporation 30 ($\pm 2,3$) Mm³, soit un volume en excès de 534 (± 26) Mm³ qui sera acheminé vers la mer (Figure 5).

3.2.2 Durant la saison estivale

Cependant, pendant la saison estivale, le bilan est le suivant : apports pluviométriques directs d'environ 6 ($\pm 0,81$) Mm³. Les apports hydrologiques et par la garaet Ichkeul sont nuls. Enfin, l'évaporation du plan d'eau est importante, se traduisant par un volume de 90 ($\pm 3,3$) Mm³. Dans ces conditions, nous pouvons poser l'hypothèse d'une incursion d'eaux marines vers la garaet Ichkeul via la lagune de Bizerte et l'oued Tinja, dont le volume est estimé à 84 ($\pm 2,5$) Mm³ (Figure 6).

4. CONCLUSION

Le bilan annuel d'échanges d'eau entre la lagune de Bizerte et le milieu marin montre qu'en hiver, un surplus d'eau douce d'environ 534 (± 26) Mm³ est évacué hors de la lagune. Ce flux important d'eau de la lagune vers le milieu marin est accompagné d'un transfert de quantités importantes de matières en suspension et de nutriments dans le même sens. Cependant, durant la saison estivale et du fait de la rareté des précipitations ainsi qu'aux fortes évaporations du plan d'eau, on assiste éventuellement à une incursion d'eaux marines (84 ($\pm 2,5$) Mm³) vers lagune de Bizerte. Ces eaux marines sont par

Tableau 3. Comparaison des débits liquides et solides annuels de l'oued Tinja dans le présent travail avec des travaux antérieurs.

Table 3. Compared water and solid yearly fluxes of wadi Tinja available from different authors.

Année hydrologique	Débit liquide annuel (Mm ³)	Débit solide annuel (10 ³ t)	Référence
1955-1956	438	756	CHAUMONT (1956)
1979	93	-	ZAOUALI (1979)
1981-1982	351	62	LEMOALLE <i>et al.</i> (1984)
1984-1985	498	113	LEMOALLE (1986)*
1990	- Avant construction des barrages : 165	-	ANPE (1990)
	- Après constructions des barrages : 20	-	
1992-1993	311	38	CHAOUACHI <i>et al.</i> , (1996)
2004-2005	418 (± 28)	28 (± 5)	Présent travail

* Communication non publiée (dans CHAOUACHI, 1996)

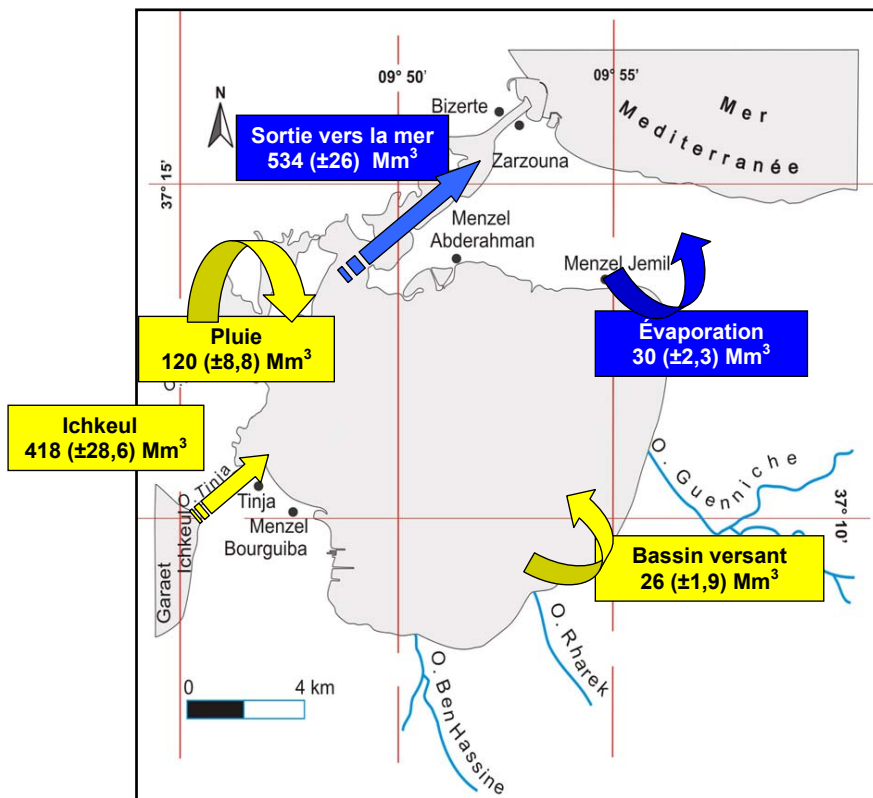


Figure 5. Bilan hydrologique de la lagune de Bizerte durant la saison hivernale.
 Hydrologic budget of the lagoon of Bizerte in winter.

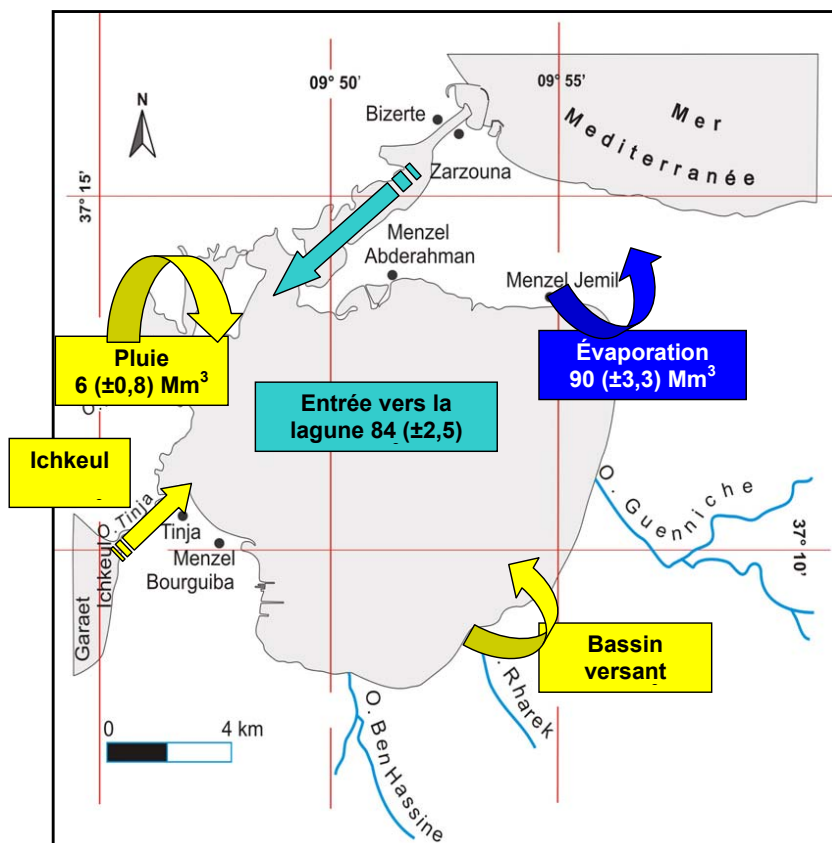


Figure 6. Bilan hydrologique de la lagune de Bizerte durant la saison estivale.
 Hydrologic budget of the lagoon of Bizerte in summer.

la suite acheminées vers la garaet Ichkeul par l'intermédiaire de l'oued Tinja.

Les eaux des oueds Haima, Ben Hassine, Rharek et Guenniche montrent des apports annuels en nutriments plus ou moins importants mais toujours plus faibles que ceux de l'oued Tinja. L'importance des apports de nutriments azotés et phosphatés inorganiques est liée non seulement aux produits de lessivage des terrains agricoles cultivés nécessitant souvent des fertilisants à base d'azote et de phosphore, mais aussi aux produits des rejets d'élevage et des eaux usées des agglomérations urbaines avoisinant la lagune et qui sont, dans la majorité, non raccordées au réseau d'assainissement. Ainsi, l'importance des apports, surtout en éléments nutritifs, peut avoir des effets nuisibles sur le fonctionnement de la lagune de Bizerte, à savoir le développement du phénomène d'eutrophisation qui favorise le dysfonctionnement de cet écosystème fragile.

5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AMINOT A. et M. CHAUSSEPIED (1983). *Manuel des analyses chimiques en milieu marins*. CNEXO (Éditeur), Paris, France, 395 p.

ANPE (Agence Nationale de protection de l'Environnement) (1990). *Diagnostic préliminaire pour l'étude de l'équilibre écologique du lac de Bizerte*. Rapport, synthèse et conclusion, 72 p.

BONTOUX J. (1983). *Introduction à l'étude des eaux douces : eaux naturelles, eaux usées et eaux de boissons*. CEBEDOC (Éditeur), Liège, Belgique, 63 p.

CHAOUACHI B., O.K. BEN HASSINE et J. LEMOALLE (1996). Variation saisonnières des débits liquides et solides de l'oued Tinja (écosystème Ichkeul). *Bull. Inst. Nat. Sci. Technol. Mer* (INSTM), 3, 32-35.

CHAUMONT M. (1956). Étude hydrologique du bassin versant du Lac Ichkeul pendant l'année agricole 1955-56. BIRH (Bureau d'Inventaires des Ressources Hydriques), Tunis, 83p.

DGEQV (Direction Générale de l'Environnement et de la Qualité de la Vie (2003). Étude sur la dépollution industrielle dans le bassin versant de la lagune de Bizerte. Direction Générale de l'Environnement et de la Qualité de la Vie. Ministère de l'Agriculture, de l'Environnement et des Ressources hydriques, Tunis, Tunisie. Rapport définitif de la phase 1, 163 p.

HAMMAMI J. (2005). *Géochimie des éléments nutritifs dans les eaux de la lagune de Bizerte (Tunisie Nord-orientale)*. DEA. Faculté des Sciences de Tunis. 130 p.

HOLLIS G.E. (1983). The modelling and management of the internationally important wetland at garaet El Ichkeul. *IWRB (International Waterfowl Research Bureau)*, publication spéciale, 4, 121 p.

INM ((2006). *Données météorologiques de la station Tinja (Bizerte-Tunisie)*. Institut National de la Météorologie, Tunis, Tunisie, 35 p.

KALLEL M.R. (1979). *Bilan global des ressources en eau de surface du secteur Nefza-Ichkeul*. Rapp. Int. DGRE (Direction Générale des Ressources en Eau), Tunis, 17 p.

KALLEL M.R. (1989). Hydrologie du lac de Bizerte. DGRE (Direction Générale des Ressources en Eau), Tunis, pp. 41.

LAMINE-LOUKIL M. (2001). *Caractérisation de la pollution des nappes souterraines par les nitrates : Application à la région de Sra Ouertane (Tunisie)*. Diplôme d'études approfondies (DEA), Faculté des Sciences de Tunis, 74 p.

LEMOALLE J. (1986). *L'oued Tinja : Observations en 1981-82*. Rapport d'activité, ORSTOM, 12 p.

LEMOALLE J., G. VIDY et J. FRANC (1984). *Rapport d'étude sur la lagune El Biban et le lac Ichkeul. Quatrième partie : Étude du lac Ichkeul*. Ministère de l'Agriculture, Tunis, 64 p.

MANSOURI T. (1996). *Application de la télédétection et des systèmes d'information. Géographiques à l'étude du fonctionnement hydrologique du lac de Bizerte et de son bassin versant*. Mémoire DEA, Faculté des Sciences de Tunis II, 101 p.

SOUSSI N. (1981). *Mécanismes de la sédimentation et évolution paléogéographique de la lagune de Bizerte (Tunisie) durant le quaternaire récent*. Thèse 3^e cycle, géologie structurale, Univ. Paul Sabatier, Toulouse, France, 229 p.

ZAOUALI J. (1979). Étude écologique du Lac de Bizerte. *Bull. Off. Nat. Pêches*, Tunisie, pp. 107-140.