

Activité de la phosphatase alcaline bactérienne à l'interface eau-sédiment au sein du réservoir Sahela (Maroc)

Bacterial alkaline phosphatase activity at the water sediment interface in the Sahela reservoir

B. ALAOUI MHAMDI, S.M. RAOUI, M. ALAOUI MHAMDI*, K. DERRAZ

Reçu le 23 avril 2001, accepté le 23 janvier 2003**.

SUMMARY

Temporal variations of phosphorus concentrations, bacterial abundance and alkaline phosphatase activity (APA) were estimated in situ in a benthic chamber. The chamber used has a surface of 0.4m² and a volume of 90 l; it resembles those used in oceanography, with a tube connecting the interior of the chamber to the lake surface. The water in the chamber was permanently mixed by an electric agitation system. The chamber was placed at two points in the Sahela reservoir (Morocco). Point 1 was located near Guelta El Haila, a site that receives both domestic and industrial effluent, and point 2 was located in the centre of the reservoir. During the two incubations, eight samples were taken over 24 d in September and October 1998 from point 1, and seven samples were taken from point 2 over 29 d in October. After each sampling, an equal volume of water was injected into the chamber to avoid bubble formation.

Under low dissolved oxygen concentrations in the benthic chamber, we noticed a relatively small elevation in orthophosphate concentrations (from 0.020 to 0.035 mg·L⁻¹ at point 1 and from 0.015 to 0.025 mg·L⁻¹ at point 2) in relation to total phosphorus (from 0.080 to 0.100 mg·L⁻¹ and from 0.035 to 0.040 mg·L⁻¹ at points 1 and 2 respectively). The low residual oxygenation of hypolimnic layer allowed the oxidation of iron, manganese and led to their binding to phosphorus released from the interstitial water. Dissociation of calcium-phosphorus complexes as a result of a pH decrease may have contributed to phosphorus release. The orthophosphate concentrations were relatively low, a situation that favours the synthesis of alkaline phosphatase by aerobic bacteria and facultative aerobic bacteria. In this period, the bacterial abundance and APA were comparable and showed the maximal values (8. 10⁶ bact. ml⁻¹ and 0.323 mmol. PNP l⁻¹.h⁻¹ (phosphate nitrophenol) in

Université SMBA, Faculté des Sciences Dhar El Mehraz, Département de Biologie, BP 1796, Atlas Fès, Maroc.

* Correspondance. E-mail : Alaouimohammed@hotmail.com

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 mars 2004.

point 1 and 6. 10^6 bact. ml^{-1} and 0.438 mmol. PNP $\text{l}^{-1}.\text{h}^{-1}$ in point 2 respectively). The lack of a significant correlation between total APA and bacterial abundance at the two sampling points is probably due to the decrease of aerobic bacteria followed by a repopulation with anaerobic bacteria. However, the relative contribution of two bacterial populations that have different sizes, as at points 1 and 2, showed that the majority of total APA was produced by bacteria that are attached to organic matter. Therefore we suggest that attached bacteria contribute more than free bacteria to APA production.

The beginning of anoxic conditions and the decrease in pH favored the dissolution of particulate phosphorus and the liberation of reactive phosphorus. We noted an elevation in orthophosphate concentrations (from 0.035 to 0.050 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ at point 1 and stabilised at 0.025 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ at point 2) and total phosphorus (from 0.100 to 0.150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ at point 1 and from 0.040 to 0.050 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ at point 2). This liberation followed an increase in anaerobic bacterial abundance (from $5\cdot 10^6$ to $9.2\cdot 10^6$ bact $\cdot\text{mL}^{-1}$ at point 1 and from $3.8\cdot 10^6$ to $7.2\cdot 10^6$ bact $\cdot\text{mL}^{-1}$ at point 2) and the progressive decrease in APA (from 0.200 to 0.025 mmol PNP $\text{L}^{-1}.\text{h}^{-1}$ at point 1 and from 0.125 to 0.077 mmol PNP $\text{L}^{-1}.\text{h}^{-1}$ at point 2). The anaerobic bacteria did not activate their alkaline phosphatase and the synthesis of their enzyme was progressively inhibited by a de-repression phenomenon caused by high phosphorus concentrations.

We conclude that low oxygen and a decrease in pH favoured the release of phosphorus by dissolution of chemical complexes: calcium-phosphorus, iron-phosphorus, manganese-phosphorus and aluminium-phosphorus. This release is also the result of bacterial phosphatase activity to which fixed bacteria contributed the most. The release of phosphorus from water-sediment interface is further amplified by phosphate import from domestic and industrial waste waters originating from Taounate, which accelerates the eutrophication process in this reservoir.

Key-words: *phosphorus, bacteria, alkaline phosphatase activity, water-sediment interface, reservoir, eutrophication.*

RÉSUMÉ

Les variations temporelles des concentrations en phosphore, celles des abondances bactériennes et de l'activité de la phosphatase alcaline (APA) ont été estimées *in situ* en chambre benthique placée en deux points du réservoir Sahela (Maroc) durant les mois de septembre et octobre 98. En période de faible oxygénation, nous avons enregistré des élévations relativement faibles des concentrations en orthophosphates (de 0,020 à 0,035 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ au point 1 et 0,015 à 0,025 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ au point 2) par rapport au phosphore total (0,080 à 0,100 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ au point 1 et de 0,035 à 0,040 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ au point 2). À cette période, les abondances bactériennes et l'APA montrent des valeurs maximales (8.10^6 bact. ml^{-1} et 0,323 mmol.PNP $\text{l}^{-1}.\text{h}^{-1}$ au point 1 et 6.10^6 bact. ml^{-1} et 0,438 mmol.PNP $\text{l}^{-1}.\text{h}^{-1}$ au point 2 respectivement). L'apparition des conditions anoxiques et la diminution du pH favorisaient la dissolution du phosphore particulaire et la libération du phosphore réactif soluble. Cette libération s'accompagne d'une élévation des abondances de bactéries anaérobies (de 5.10^6 à $9.2.10^6$ bact. ml^{-1} au point 1 et de $3.8.10^6$ à $7.2. 10^6$ bact. ml^{-1} au point 2) et une diminution progressive d'APA (de 0,200 à 0,025 mmol.PNP $\text{l}^{-1}.\text{h}^{-1}$ au point 1 et de 0,125 à 0,077 mmol.PNP $\text{l}^{-1}.\text{h}^{-1}$ au point 2). Ce relargage du phosphore à partir du sédiment est accentué par les rejets domestiques et industriels de la ville de Taounate, ce qui accélère le processus d'eutrophisation de ce réservoir.

Mots clés : *phosphore, bactéries, activité phosphatase alcaline, eau-sédiment, réservoir, eutrophisation.*

1 – INTRODUCTION

Il a été admis ces dernières décennies que le phosphore est le principal élément chimique qui contribue au processus d'eutrophisation affectant les écosystèmes aquatiques (VOLLENWEIDER, 1968, GOLTERMAN et DE OUDE, 1991, CAVALCANTE, 1994). Dans les milieux lacustres, la majorité du phosphore entrant dans le lac est piégé dans le sédiment. Lors de la stratification thermique, les conditions de déficience en oxygène provoquent la dissolution du phosphore qui passe de la forme particulaire à la forme dissoute, biodisponible pour le phytoplancton (CHROST et OVERBECK, 1987, KASSILA *et al.*, 2001, HASNAOUI *et al.*, 2001). L'étude des échanges du phosphore à l'interface eau-sédiment revêt donc une importance primordiale dans la perspective d'une restauration des écosystèmes lacustres (PHILIPPE, 1989, ALAOUI et ALEYA, 1995, RAMM et SCHEPS, 1997, TOORNBLOM et RYDIN, 1998).

Par ailleurs, le rôle des bactéries dans la libération de cet élément en milieu lacustre a été largement étudié (GÄCHTER *et al.*, 1988, GÄCHTER et MEYER, 1993, ALAOUI *et al.*, 1994). Toutefois et à notre connaissance, les données relatives à l'activité phosphatasique bactérienne à l'interface eau-sédiment demeurent rares inexistantes.

Le présent travail a pour objectif, l'étude des échanges du phosphore à l'interface eau-sédiment et le rôle de la communauté bactérienne, par son activité phosphatasique, dans la libération de cet élément dans le réservoir Sahela situé sous un climat méditerranéen semi-aride. Ce plan d'eau est exposé à des risques d'eutrophisation du fait qu'il reçoit des apports exogènes qui sont d'origines diverses en particulier les rejets domestiques et industriels de la ville de Tounate.

2 – MATÉRIEL ET MÉTHODES

Le réservoir Sahela est situé sur l'oued Sahela à 5 km de la ville de Taounate (34° 30' N, 4° 45' W). Ce réservoir est mis en eau depuis 1994, il a un volume de 64.10^6 m³ et une profondeur maximale de 50 m (figure 1). Les eaux de cette retenue sont destinées à l'irrigation et à l'alimentation en eau potable de la ville de Taounate.

Les mesures des échanges des éléments nutritifs à l'interface eau-sédiment au fond du réservoir ont été réalisées *in situ* en chambre benthique. Cette dernière, d'une surface au sol de 0,4 m² et d'un volume de 90 litres (ALAOUI *et al.*, 1993), est inspirée des modèles employés lors d'études similaires, principalement en océanographie (HALL, 1984). Le prélèvement est réalisé grâce à la présence d'un tuyau d'une contenance de 500 ml d'eau prélevée et rejetée après homogénéisation. Le prélèvement d'échantillon au sein de la chambre benthique est réalisé à 25 cm de l'interface eau-sédiment.

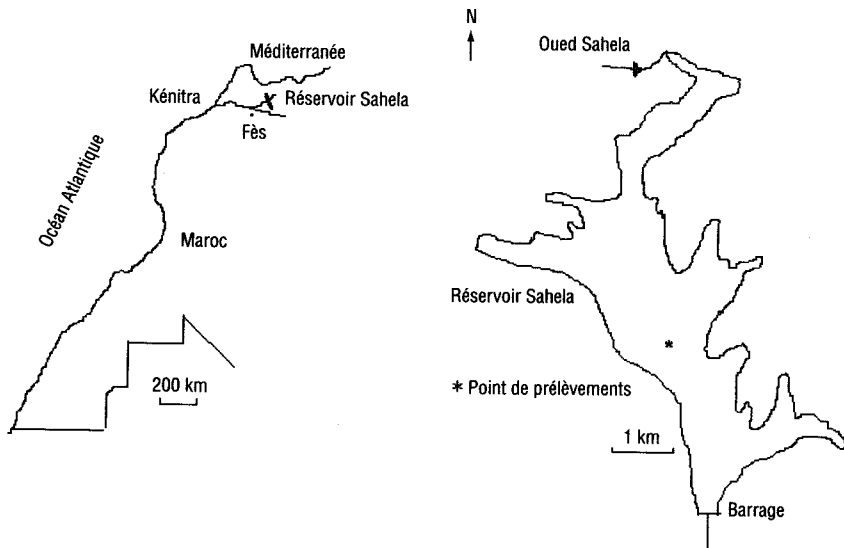


Figure 1 Situation géographique du réservoir Sahela.
The geographic location of the Sahela reservoir.

La chambre benthique a été placée au niveau de deux points d'échantillonnages différents. Le point 1 est situé au centre d'un bras du lac appelé Guelta El Haila à une profondeur de 14-15 m ; cette station est caractérisée par la présence d'un déversement des eaux usées d'origine domestique et industrielle de la ville de Taounate. Le point 2 est situé au milieu du lac à une profondeur de 17-18 m en période de faible oxygénation ($O_2 < 3 \text{ mg.l}^{-1}$) des eaux profondes. Les prélèvements d'un volume variant de 500 à 1000 ml ont été réalisés, suivant un pas d'échantillonnage bihebdomadaire du 8 septembre à 2 octobre 98 (point 1) et du 2 au 31 octobre 98 (point 2).

Durant toute la période d'expérimentation, les eaux prélevées au niveau des profondeurs avoisinantes de l'emplacement de la chambre benthique, dans les deux points, ont révélé des températures dont les valeurs ne présentent pas de grandes variations (17 à 19 °C).

2.1 Analyses chimiques

Le pH a été mesuré à l'aide d'un pH mètre de type Orion Research, les concentrations en oxygène dissous ont été déterminées par la méthode de Winkler, Les concentrations en orthophosphates et le phosphore total ont été mesurées sur l'eau brute selon le protocole colorimétrique proposé par MURPHY et RILEY (1962), celles du phosphore total dissous ont été réalisées après filtration sous vide sur membrane GF/C de 0,45 μm de porosité, afin d'éliminer la part du phosphore particulaire (MURPHY et RILEY 1962). Les concentrations

en fer ferreux ont été déterminées par méthode colorimétrique donnant un composé coloré rouge après réaction avec l'orthophénantroline, celles du calcium ont été réalisées par complexométrie à l'EDTA (RODIER, 1984). Les concentrations en manganèse et en aluminium ont été déterminées par spectrophotométrie d'absorption atomique suivant les normes françaises à savoir NFP 90 - 048 pour le manganèse et NFP 90 - 0136 pour l'aluminium.

2. 2 Analyses biologiques

Les abondances bactériennes ont été déterminées en microscopie à épifluorescence après coloration à l'acridine orange (0,02 %) selon le protocole proposé par HOBBIÉ *et al.* (1977). Lors du comptage, entre 1500 et 2000 cellules réparties sur 20 champs différents sont dénombrées. Cela conduit à une précision de comptage supérieure à 7 % au seuil de confiance 90 % (OVERBECK, 1974, MARVALIN *et al.* 1989).

Le dosage de l'Activité Phosphatase Alcaline (APA) a été réalisé sur des échantillons d'eau de 100 ml immédiatement filtrés sous vide modéré (< 100 mm Hg) à travers des membranes GF/C de porosité 0,22 μm et 0,65 μm . Ces filtres placés dans des tubes à hémolyse stériles ont été mis en contact avec 3 ml du tampon (Tris-HCl 0,1 M, Mg^{++} 10^{-3} M, pH 8,5) et 1 mg. ml^{-1} de p-Nitrophényl phosphate (p-NPP). Après incubation à 37° C et sous une légère agitation pendant 6 heures, les tubes ont été mis dans la glace afin d'arrêter la réaction. La lecture spectrophotométrique a été réalisée à 410 nm (REICHARD *et al.*, 1967). Les résultats sont exprimés en mmol p-Nitrophénol (PNP) libéré par litre et par heure pour trois fractions de taille 0,22-100 μm (APA totale) ; 0,65-100 μm (APA liée en majorité aux bactéries fixées) et une fraction de 0,22-0,65 μm (APA liée en majorité aux bactéries libres).

3 - RÉSULTATS

3. 1 Point 1

Les concentrations en oxygène dissous enregistrées le 1^{er} jour étaient de 3 mg.l^{-1} et décroissent pour atteindre 0 mg.l^{-1} le 15^e jour (figure 2 a). Les valeurs du pH s'abaissent également de 8,4 le 1^{er} jour à 7,4 le 22^e jour (figure 2 a). Les concentrations du phosphore total ont varié entre 0,07 à 0,15 mg.l^{-1} et celles du phosphore total dissous, de 0,02 à 0,10 mg.l^{-1} (figure 2 b). Les concentrations des orthophosphates ont montré une variation similaire à celles du phosphore total (entre 0,02 à 0,05 mg.l^{-1}) (figure 2 b). Nous notons que les maximums des concentrations en phosphore total et en orthophosphates ont été enregistrés au 22^e jour de l'expérience. Les concentrations en calcium ont varié de 28,0 à 34,4 mg.l^{-1} (figure 3 a). Celles du fer ferreux, du manganèse et de l'aluminium sont plus faibles que celles du calcium et ont varié de 14 à 199 $\mu\text{g.l}^{-1}$, de 5 à 21 $\mu\text{g.l}^{-1}$ et de 5 à 22 $\mu\text{g.l}^{-1}$ respectivement (figures 3 b, c, d).

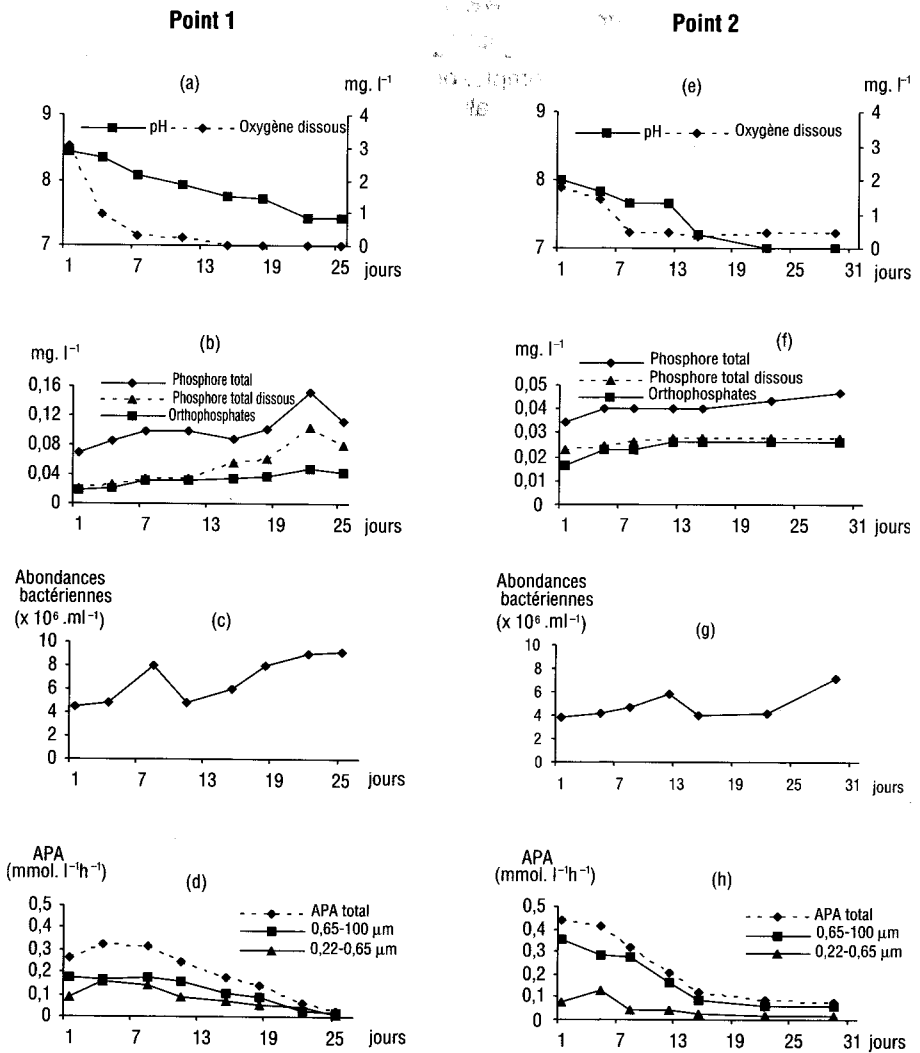


Figure 2 Variations temporelles du pH, des concentrations d'oxygène dissous et du phosphore, des densités bactériennes et de l'activité phosphatase alcaline (APA) à l'interface eau-sédiment au niveau des deux points d'échantillonnage.

Temporal changes of pH, dissolved oxygen concentrations, phosphorus, bacterial density and alkaline phosphatase activity (APA) at the sediment-water interface at two sampling stations.

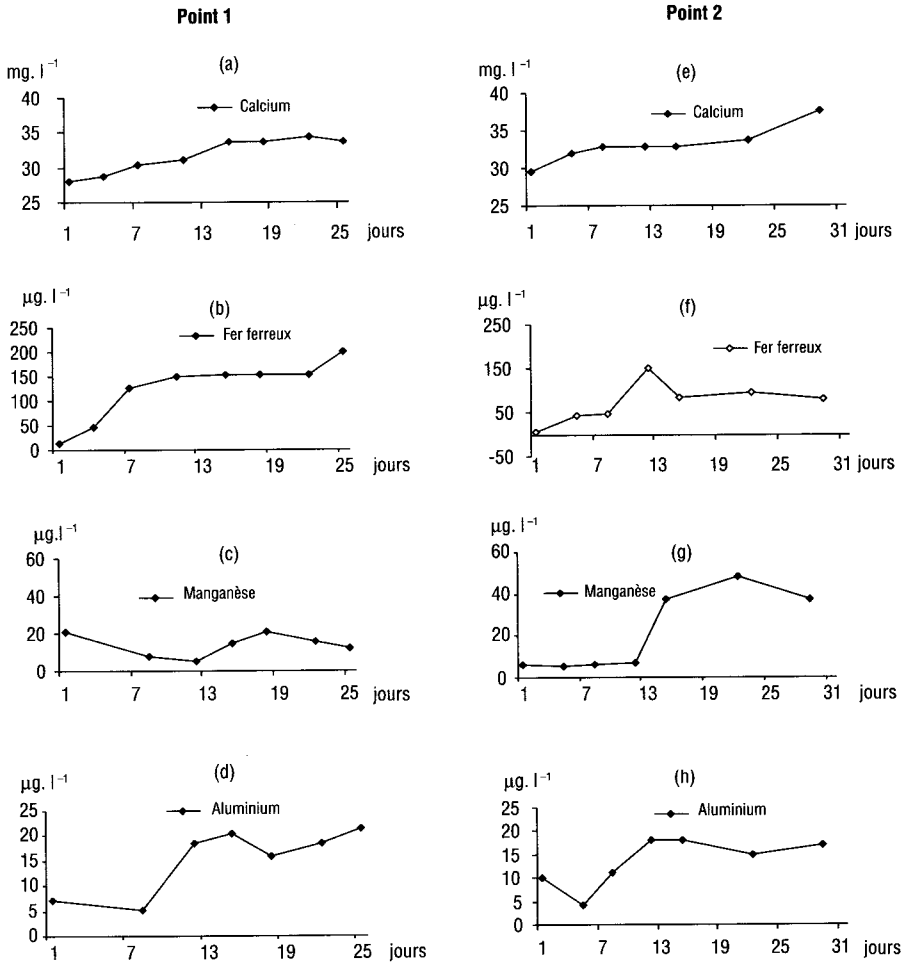


Figure 3 Variations temporelles des concentrations du calcium, du fer ferreux, du manganèse et d'aluminium à l'interface eau-sédiment au niveau des deux points d'échantillonnage.

Temporal changes in calcium, ferrous iron, manganese and aluminium concentrations at the sediment-water interface at two sampling stations.

Au cours de cette étude, les abondances bactériennes varient de $4,5 \cdot 10^6$ bact. ml⁻¹ enregistré au 1^{er} jour à $9,2 \cdot 10^6$ bact. ml⁻¹ enregistré le 26^e jour (figure 2 c). Les variations temporelles de la communauté bactérienne font apparaître deux périodes de développement. Durant la première, les effectifs passent de $4,5 \cdot 10^6$ à $8,0 \cdot 10^6$ bact. ml⁻¹ puis diminuent pour atteindre $5 \cdot 10^6$ bact. ml⁻¹. La seconde correspond à une phase de croissance exponentielle où le nombre de bactéries passe de $5,0 \cdot 10^6$ à $9,2 \cdot 10^6$ bact. ml⁻¹.

L'APA totale varie entre 0,025 enregistré le 26^e jour et 0,323 mmol PNP l⁻¹ h⁻¹ enregistré le 4^e jour (figure 2 d). L'APA associée à la fraction de taille 0,22-0,65 µm varie entre 0,005 mmol PNP l⁻¹ h⁻¹ enregistré le 26^e jour et 0,157 mmol PNP l⁻¹ h⁻¹ enregistré le 4^e jour, ce qui représente 20 à 65% (moyenne 41%) d'APA totale. La fraction 0,65-100 µm a montré une activité qui varie entre 0,020 mmol PNP l⁻¹ h⁻¹ enregistré le 26^e jour et 0,174 mmol PNP l⁻¹ h⁻¹ enregistré le 1^{er} jour, représentant ainsi 35 à 80 % (moyenne 59 %) d'APA totale.

3.2 Point 2

Les concentrations en oxygène dissous (0,3 à 1,8 mg.l⁻¹) ont montré une diminution sans atteindre l'anoxie totale (figure 2 e), le pH de l'eau décroît et se stabilise à la neutralité au 22^e jour de l'expérience (figure 2 e). Les concentrations en phosphore total ont varié entre 0,03 et 0,05 mg.l⁻¹ et celles du phosphore total dissous entre 0,02 et 0,03 mg.l⁻¹. Les concentrations des orthophosphates ont varié entre 0,02 et 0,03 mg.l⁻¹ (figure 2 f), et montrent une stabilité des concentrations au 12^e jour qui se maintient jusqu'à la fin de l'expérience. Les concentrations en calcium ont montré un pic au 12^e jour, les valeurs extrêmes ont fluctué entre 30 et 37 mg.l⁻¹ (figure 3 e). Celles du fer ferreux, du manganèse et de l'aluminium sont plus faibles que celles du calcium et ont varié de 6 à 151 µg.l⁻¹, de 5 à 50 µg.l⁻¹ et de 5 à 18 µg.l⁻¹ respectivement (figure 3 f, g, h). Les concentrations en fer ferreux et en manganèse enregistrées au point 1 ($m = 143,29 \pm 61,06 \mu\text{g.l}^{-1}$; $m = 21,22 \pm 2,64 \mu\text{g.l}^{-1}$ respectivement) dépassent largement celles enregistrées au point 2 ($m = 72,68 \pm 42,71 \mu\text{g.l}^{-1}$; $m = 13,17 \pm 5,74 \mu\text{g.l}^{-1}$ respectivement), alors que celles du calcium et de l'aluminium sont semblables au point 1 ($m = 32,15 \pm 5,11 \mu\text{g.l}^{-1}$; $m = 14,94 \pm 6,24 \mu\text{g.l}^{-1}$) et au point 2, ($m = 33,02 \pm 2,21 \mu\text{g.l}^{-1}$; $m = 13,28 \pm 4,27 \mu\text{g.l}^{-1}$) respectivement. Les concentrations des orthophosphates et du phosphore total libérés sont plus importantes au point 1 ($m = 0,033 \pm 0,013 \mu\text{g.l}^{-1}$; $m = 0,100 \pm 0,059 \mu\text{g.l}^{-1}$ respectivement) qu'au point 2 ($m = 0,024 \pm 0,003$; $m = 0,0405 \pm 0,0033$ respectivement).

Les densités bactériennes varient entre $3,8 \cdot 10^6$ bact. ml⁻¹ enregistré le 1^{er} jour et $7,2 \cdot 10^6$ bact. ml⁻¹ enregistré le 29^e jour (figure 2 c), et montrent des fluctuations semblables à celles enregistrées au niveau du point 1. Nous notons que le nombre de bactéries enregistrées au point 1 ($m = 6,8 \cdot 10^6 \pm 1,8 \cdot 10^6$ bact. ml⁻¹) dépasse celui enregistré au point 2 ($m = 4,8 \cdot 10^6 \pm 1,1 \cdot 10^6$).

L'APA déterminée à ce point varie entre 0,077 mmol PNP l⁻¹ h⁻¹ enregistré le 29^e jour et 0,438 mmol PNP l⁻¹ h⁻¹ enregistré le 1^{er} jour (figure 2 d). L'APA liée à la fraction 0,22-0,65 µm est comprise entre 0,018 mmol PNP l⁻¹ h⁻¹ enregistré le 29^e jour et 0,131 mmol PNP l⁻¹ h⁻¹ enregistré le 5^e jour. Cette activité représente un pourcentage qui varie entre 14 et 31% (moyenne 22%) d'APA totale. La fraction 0,65-100 µm montre une activité qui varie entre 0,059 mmol PNP l⁻¹ h⁻¹ enregistré le 29^e jour et 0,357 mmol PNP l⁻¹ h⁻¹ enregistré le 1^{er} jour, ce qui représente 69 à 86 % (moyenne 78 %) d'APA totale. L'APA des deux fractions de taille montre des fluctuations temporelles semblables à celles d'APA totale.

Que ce soit au point 1 ou au point 2, l'APA est maximale durant les premiers jours de l'installation de la chambre benthique, et diminue progressive-

ment pour atteindre des valeurs minimales au dernier jour de l'expérience. Nous notons également que l'APA associée à la fraction 0,65-100 μm au point 1 ($m = 0,113 \pm 0,088$) et au point 2 ($m = 0,185 \pm 0,112$) dépasse celle associée à la fraction 0,22-0,65 μm au point 1 ($m = 0,081 \pm 0,046$) et au point 2 ($m = 0,052 \pm 0,036$).

L'analyse statistique par régression linéaire laisse apparaître une corrélation significative négative entre l'APA totale et les concentrations en orthophosphates au niveau du point 1 ($r = -0,67$, $p < 0,05$) et au niveau du point 2 ($r = -0,56$, $p < 0,05$). Nous notons l'absence de corrélation significative ($p > 0,05$) entre l'APA totale et les abondances bactériennes.

4 – DISCUSSION

Aux premiers jours de l'installation de la chambre benthique, la faible oxygénation des couches hypolimniques permettrait l'oxydation du fer, du manganèse et ou de l'aluminium ce qui conduirait à la complexation des ions orthophosphates issus probablement de l'eau interstitielle et/ou de la dissociation des complexes calcium-phosphore sous l'effet de la diminution du pH (ALAOUI et ALEYA, 1995, GOLTERMAN, 1998) ; la part du phosphore particulaire est donc non négligeable. À cette période, les concentrations en orthophosphates sont relativement faibles, ce qui a entraîné la synthèse de la phosphatase alcaline par les bactéries. Les valeurs de l'APA totale enregistrées au niveau du point 1 sont inférieures à celles enregistrées au point 2. Cette différence est attribuée au fait que le point 2 n'atteint pas des valeurs d'anoxie totale qui favoriserait la libération des orthophosphates, ces derniers se trouvent sous forme particulaire, donc non biodisponibles, ce qui favorise la synthèse de l'enzyme par les bactéries. Dans le réservoir Sahela, nous notons au point 1 comme au 2 que l'APA totale présente une corrélation significative inverse vis-à-vis des concentrations en orthophosphates. Ces résultats sont similaires à ceux enregistrés par GAGE et GORHAM (1985). Ces derniers ont considéré l'APA comme un indicateur de déficience en phosphore en milieu aquatique. Toutefois, nos résultats semblent être différents à ceux constatés par JAMET *et al.* (1997) et RAOUI *et al.* (2002), puisque ces auteurs ont suggéré une indépendance entre l'APA et les orthophosphates au niveau de la colonne d'eau. Dans notre cas, nous pouvons avancer que la période de faible oxygénation où les concentrations en orthophosphates ont été faibles, a entraîné une synthèse de l'APA par les bactéries aérobies et aérobies facultatives, répondant ainsi à un éventuel déficit en orthophosphates. Cette propriété d'inductibilité de l'APA vis-à-vis du phosphore a été démontré par plusieurs auteurs (HEALEY et HENDZEL, 1979, GAGE et GORHAM, 1985). De plus, les variations temporelles des concentrations en phosphore indiquent également que la libération de cet élément à partir du sédiment au niveau du point 1 est plus important que celui enregistré au point 2. Cette différence quantitative pourrait influencer sur la synthèse de l'enzyme, puisque l'APA totale enregistrée au point 2 dépasse celle enregistrée au point 1. Cependant l'analyse statistique semble indiquer une indépendance entre l'APA totale et les abondances

bactériennes au niveau des deux points 1 et 2. Cette absence de corrélation significative pourrait être expliquée par l'alternance dans le temps de populations bactériennes aérobies qui décroissent au 15^e jour de l'expérience au profit des bactéries anaérobies. Toutefois, nous supposons que lors des premiers jours de l'étude, l'APA pourrait être significativement corrélée aux bactéries aérobies. Ce test est irréalisable dans notre cas avec seulement quatre échantillons. La corrélation significative entre l'APA et les bactéries a été constatée au niveau de la colonne d'eau par RAOUI *et al.* (2002).

La contribution relative des deux fractions de taille aux deux points (1 et 2) montre que la plus grande part de l'APA totale est réalisée par les bactéries fixées (0,65-100 μm) sur la matière organique particulaire non vivante, dans la mesure où l'APA algale serait exclue. Cela suggère que les bactéries fixées contribuent mieux à l'APA que les bactéries libres.

Pendant l'apparition des conditions anoxiques, la communauté est strictement anaérobie, a montré une augmentation de densité. Ce développement apparaît parallèlement à celui des orthophosphates, alors que l'activité phosphatasique diminue progressivement. Nous pouvons suggérer que les bactéries anaérobies n'activent pas leur phosphatase alcaline et que la synthèse de cette enzyme serait inhibée progressivement par phénomène de dépression liée aux concentrations élevées des ions orthophosphates. L'examen des variations temporelles des concentrations en orthophosphates montre une croissance stable au niveau des deux points (1 et 2). Ce phénomène pourrait être attribué à leur assimilation par les bactéries (CABPLANCQ, 1990). Toutefois, ces micro-organismes peuvent contribuer (sans APA) au relargage du phosphore à partir du sédiment, traduisant l'intervention des bactéries dans la régulation des concentrations du phosphore en condition d'anaérobiose. En effet, au niveau du point 1 où les apports exogènes sont importants, la forte prolifération bactérienne pourrait être due à la dégradation de la matière organique, ce qui conduirait à une élévation de la demande en oxygène qui maintient les conditions légèrement anaérobies, et favoriserait la dissolution des complexes phosphore-fer, phosphore-manganèse et phosphore-aluminium. En effet, les concentrations en fer ferreux, en aluminium et en manganèse ont montré une élévation qui va globalement dans le même sens d'une augmentation des concentrations en orthophosphates. Par ailleurs, il a été démontré que les bactéries peuvent solubiliser les formes complexées de ces éléments avec le phosphore par le biais de l'excrétion de molécules de faible poids moléculaire (FLEISCHER *et al.*, 1988). DRAKE et HEANEY (1987) ont avancé que les bactéries contribuent à l'acidification du milieu par la production d'acides organiques à partir de la dégradation de la matière organique, qui entraînerait une diminution du pH et donc la dissociation du complexe calcium-phosphore.

Au point 2, la différence entre les concentrations en orthophosphates et en phosphore total dissous correspondrait à la matière particulaire bactérienne. En effet, le phosphore bactérien peut contribuer jusqu'à 80 % du phosphore particulaire total (GÄCHTER *et al.*, 1988).

Les concentrations en phosphore enregistrées au point 1 dépassent celles enregistrées dans d'autres réservoirs marocains (ALAOUÏ *et al.*, 1995, BOUHADDIOUÏ, 1997), alors que celles enregistrées au point 2 sont relativement faibles. Ceci est probablement lié aux rejets directs des eaux usées au point 1. Les valeurs des concentrations en calcium et en fer ferreux et les abondances

bactériennes sont du même ordre de grandeur que celles enregistrées dans d'autres réservoirs marocains (ALAOUI *et al.*, 1995, BOUHADDIOUI, 1997).

En conclusion, l'apparition des conditions de déficience en oxygène dissous et la diminution du pH favoriseraient la libération du phosphore par la dissolution des complexes calcium-phosphore, fer-phosphore, manganèse-phosphore et aluminium-phosphore. Cette libération serait également le résultat d'une activité phosphatasique bactérienne à laquelle les bactéries fixées contribuent majoritairement. Ce relargage du phosphore à partir du sédiment est accentué par les rejets domestiques de la ville de Taounate et conduirait à l'apparition des signes d'eutrophisation précoce du réservoir Sahela.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALAOUI M.M., ALEYA L., RESTITUITO F., DEVAUX J., 1993. Optimisation méthodologique de l'utilisation des chambres benthiques pour l'estimation des flux de divers éléments chimiques à l'interface eau-sédiment des écosystèmes limniques. *Cah. INRA*, 30, 47-54.
- ALAOUI M.M., ALEYA L., DEVAUX J., 1994. Phosphorus exchanges between sediment and water in trophically different reservoirs. *Wat. Res.* 28, 1971-1980.
- ALAOUI M.M., ALEYA L., 1995. Assessment of eutrophication of Al Massira reservoir (Morocco) by means a survey of the biogeochemical balance of phosphate. *Hydrobiologia*, 297, 75-82.
- ALAOUI M.M., ALEYA L., DEVAUX J., 1995. Examination through a principal component analysis of the phosphorus exchanges between sediments and water in trophically different reservoirs. *Hydrobiologia*, 300/301, 383-389.
- BOUHADDIOUI A., 1997. Bilans biogéochimiques de l'azote et du phosphore et dynamique des populations phytoplanctoniques de la retenue de barrage Allal El Fassi, Thèse de 3^e cycle, 187 p.
- CAPBLANCQ J., 1990. Nutrient dynamics and pelagic food web interaction in oligotrophic and eutrophic environments : an overview. *Hydrobiologia*, 207, 1-14.
- CAVALCANTE P.R., 1994. Étude sur la mobilisation du phosphore, des formes azotées et de quelques métaux associés dans les vases eutrophes : expérimentation sur les vases de l'Endre « *insitu* » et en laboratoire. Thèse. Doct. Uni. Nantes, 164 p.
- CHROST R.J., OVERBECK J., 1987. Kinetic of alkaline phosphatase activity and phosphorus availability for phytoplankton and bacterioplankton in lake Plub see (North German eutrophic lake). *Microb. Écol.*, 13, 229-248.
- DRAKE J.C., HEANEY S. I., 1987. Occurrence of phosphorus and its potential remobilization in the littoral sediments of a productive english lake. *Freshwater Biol.*, 17, 513-523.
- FLEISHER S., BENGTSSON M., JOHANSSON G., 1988. Mechanism of the aerobic Fe (III)-P solubilisation at the sediment-water interface. *Verh. Int. Ver. Limnol.*, 23, 1825-1829.
- GÄCHTER R., MEYER J. S., 1993. The role of microorganisms in mobilization and fixation of phosphorus in sediments. In P.C.M. Boers, T. E. Cappenberg & W. van Raaphorst (eds), proceedings of the third International Work shop on phosphorus in sediments. Developments in Hydrobiology 84. Kluwer academic publishers, Dordrecht: 103-121. Reprinted from *Hydrobiologia*, 253.
- GÄCHTER R., MEYER J.S., MARES A., 1988. Contribution of bacteria to release and fixation of phosphorus in lake sediments. *Limnol. Oceanogr.*, 33, 1542-1558.
- GAGE M.A., GORHAM E., 1985. Alkaline phosphatase activity and cellular

- phosphorus as an index of the phosphorus status of phytoplankton in Minnesota lake. *Freshwat. Biol.*, 15, 227-233.
- GOLTERMAN H.L., 1998. The distribution of phosphate over iron-bound and calcium-bound phosphates in stratified sediments. *Hydrobiol.*, 364, 75-81.
- GOLTERMAN H.L., DE OUDE N. T., 1991. Eutrophication of lakes, rivers and coastal seas. in the handbook of environmental chemistry. Vol. 5 Part A, Ed. O. Hutzinger.
- HALL P., 1984. Chemical fluxes at the sediment-sea water interface : *in situ* investigations with benthic chambers. P.H.D.thesis. Kemihuset, Chalmers, Tekniska, Högskola Göteborg, 138 p.
- HASNAOUI M., KASSILA J., LOUDIKI M., DROUSSI M., BALVAY G., BARROIN G., 2001. Relargage du phosphore à l'interface eau-sédiment dans des étangs de pisciculture de la station Deroua (Béni Mellal, Maroc), *Rev. Sci. Eau* 14/3, 307-322.
- HEALEY F.P., HENDZEL L.L., 1979. Indicators of phosphorus and nitrogen deficiency in five algae in culture. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, 36, 1364-1369.
- HOBBIE J.E., DALEY R.J., JASPER S., 1977. Use of Nucleopore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy. *Appl. Envir. Microbiol.*, 33, 1225-1228.
- JAMET D., AMBLARD C., DEVAUX J., 1997. Seasonal changes in alkaline phosphatase activity of bacteria and microalgae in lake Pavin (Massif central, France). *Hydrobiologia*, 347, 185-195.
- KASSILA J., HASNAOUI M., DROUSSI M., LOUDIKI M., YAHYAOU A., 2001. Relation between phosphate and organic matter in fish-pond sediments of the Deroua fish farm (Béni-Mellal, Morocco): implications for pond management. *Hydrobiologia*, 450, 57-70.
- MARVALIN O., ALEYA L., HARTMAN H.J., LAZREK S., 1989. Coupling of the seasonal patterns of bacterioplankton and phytoplankton in a eutrophic lake. *Can. J. Microbiol.*, 35, 706-712.
- MURPHY J., RILEY J.P., 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Annal. Chim. Acta.*, 27, 31-36.
- OVERBECK J., 1974. Microbiology and biochemistry. *Mih. Internat. Verein. Limnol.*, 20, 198-228.
- PHILIPPE L., 1989. Bilan biogéochimique du fer et du phosphore dans un écosystème lacustre eutrophe : Le lac d'Aydat (Puy-de-Dôme). Thèse. Doct. Univ. Paris VII, 143 p.
- RAOUI S.M., RACHIQ S., ALAOUI MHAMDI M., CHADLI N., 2002. Processus d'eutrophisation : activité de la phosphatase alcaline du microplancton d'un réservoir mésotrophe marocain (Allal El Fassi). *Rev. Sci. Eau*, Vol. 15, N° 1, 51-62.
- RAMM K., SCHEPS V., 1997. Phosphorus balance of a polytrophic shallow lake with the consideration of phosphorus release. *Hydrobiologia*, 342-343, 43-53.
- REICHARDT W., OVERBECK J., STEUBING L., 1967. Free dissolved enzyme in lake waters. *Nature*, 216, 1345-1347.
- RODIER J., 1984. Analyse de l'eau, 7^e édition ; DUNOD, Paris.
- TOÖRNBLUM E., RYDIN E., 1998. Bacterial and phosphorus dynamics in profundal lake Erken sediments following the deposition of diatoms: a laboratory study. *Hydrobiologia*, 364, 55-63.
- VOLLENWEIDER R.A., 1968. Les bases scientifiques de l'eutrophisation des lacs et des eaux courantes sous l'aspect particulier du phosphore et de l'azote comme facteurs d'eutrophisation. OCDE, Paris.