

Article

« Comportement du phosphore dans le sédiment d'un estuaire semi-fermé. Cas de l'embouchure d'Oum Er-Biâa (Maroc - Atlantique) »

M. El Jakani, I. El Karim, J. E. Dafir, M. Benzakour et B. Jaaïdi

Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 15, n° 1, 2002, p. 251-261.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/705450ar>

DOI: 10.7202/705450ar

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

Comportement du phosphore dans le sédiment d'un estuaire semi-fermé. Cas de l'embouchure d'Oum Er-Biâa (Maroc – Atlantique)

Behavior of phosphorus in the sediment of Oum Er-Biaa estuary (Morocco – Atlantic)

M. EL JAKANI ¹*, I. EL KARIM ¹, J.E. DAFIR ¹, M. BENZAKOUR ², B. JAAÏDI ²

SUMMARY

The study of the estuary of Oum er-Biâa, located on the moroccan atlantic near the Azemmour city, far 60 km in the south of Casablanca, focus on the hydrogeochemical behavior of phosphorus. In the sediment of the estuary of Oum er-Biâa, total phosphorus was mainly in mineral form (76%-95%), with a predominance of the fraction related to calcium (45%-90%), that was in apatitic form and not mobilizable. The ferric fraction P-Fe (2%-38%) contributed mainly to the biodisponibility of phosphorus in this estuary. The temporal and spatial variations of this fraction were controlled on the one hand, by the characteristics of the sediment (particule fraction < 63 µm and organic matter) and, on the other hand, by the salinity. Indeed, the upstream muddy zone rich in organic matter had a high capacity to uptake the phosphorus (P-Fe and ROP) in march and july. In the downstream sandy zone, the magnetite presented a great importance for the adsorption of phosphorus, specially at high salinity during may and october.

Key-words: *estuary, phosphorus, sediment, bioavailability, magnetite, salinity.*

RÉSUMÉ

L'estuaire d'Oum Er-Biâa est situé sur le versant atlantique marocain, à 60 km au sud de Casablanca. Cette étude concerne le comportement hydrogéochimique du phosphore, élément essentiel dans le fonctionnement des écosystèmes côtiers et océaniques.

Le phosphore sédimentaire au niveau de l'estuaire d'Oum Er-Biâa est majoritairement sous forme minérale (76 % à 95 %), avec prédominance de la

1. Faculté des sciences Ain Chock, Laboratoire de sédimentologie et de l'environnement, BP 7028 Ain Chock, 20153, Casablanca, Maroc.

2. Faculté des sciences Agdal, département des sciences de la terre, Rabat.

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

Les commentaires seront reçus jusqu'au 31 mars 2003.

fraction calcique P-Ca (45 % à 90 %) qui est de nature apatitique non mobilisable. La biodisponibilité du phosphore dans l'estuaire d'Oum Er-Biâa est assurée principalement par la fraction ferrique P-Fe (2 % à 38 %). La répartition spatiotemporelle de cette fraction est contrôlée d'une part, par la nature du sédiment (teneurs en fraction fine et matière organique) en amont de l'estuaire (zone vaseuse) et, d'autre part, par les variations de la salinité et le taux de concentration de minéraux d'oxyde de fer, et notamment, la magnétite, en aval de l'estuaire (zone sableuse).

Mots clés : estuaire, phosphore, sédiment, biodisponibilité, magnétite, salinité.

1 – INTRODUCTION

L'estuaire d'Oum Er-Biâa (OEB), situé sur la côte atlantique marocaine, à proximité de la ville d'Azemmour (33° 19' 50"N, 8° 20' 10"W) (figure 1a et b), a subi, au cours des vingt dernières années, de profonds bouleversements hydrodynamiques et morphologiques, qui ont affecté les équilibres écologiques du système, comme en témoignent la baisse considérable de la productivité et la disparition de l'Alose observée par les pêcheurs.

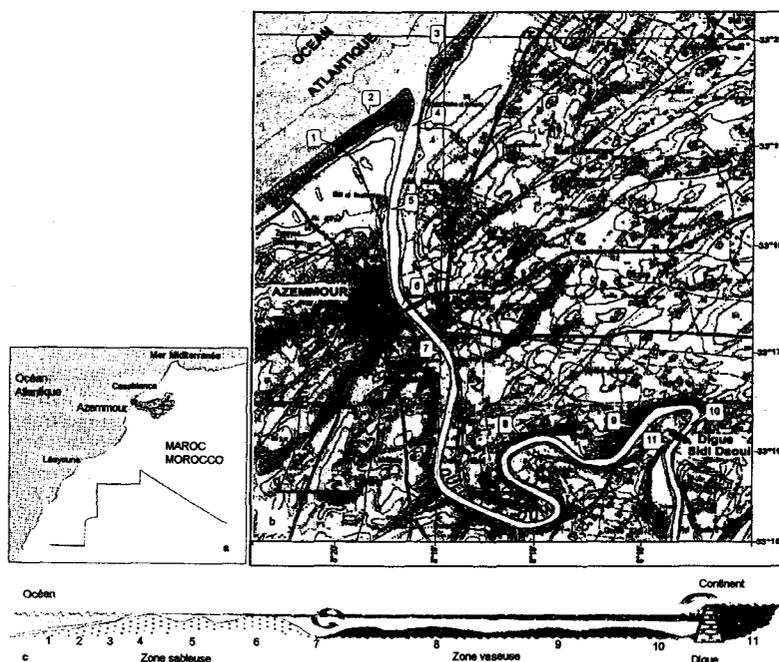


Figure 1 Carte géographique (a, b) et coupe morphologique (c) de l'estuaire d'Oum Er-Biâa. Localisation des stations de prélèvement d'eau et de sédiment.

Geographical map (a, b) and morphological profile (c) of the estuary of Oum Er-Biâa. Location of water and sediment sampling stations.

L'ensablement massif de l'embouchure a fait apparaître un profil semi fermé de l'estuaire, caractérisé par deux zones bien distinctes (*figure 1c*) : une zone aval (du côté de l'océan) peu profonde (1,5 m à 3 m) formée essentiellement de sable fin à moyen (taille médiane des particules : $259 \pm 30 \mu\text{m}$; plus de 99 %) et une zone amont plus profonde (de 5 m à 9 m) à méandre, constituée de vase (taille médiane des particules : $17 \pm 7 \mu\text{m}$; 20 à 98 %) et riche en matière organique (2 à 10 %) (*figure 2*). L'identification des différentes formes du phosphore du sédiment, leur évolution tant à l'échelle spatiale que temporelle ainsi que les facteurs influençant leur distribution dans l'estuaire, constituent les principaux objectifs de ce travail.

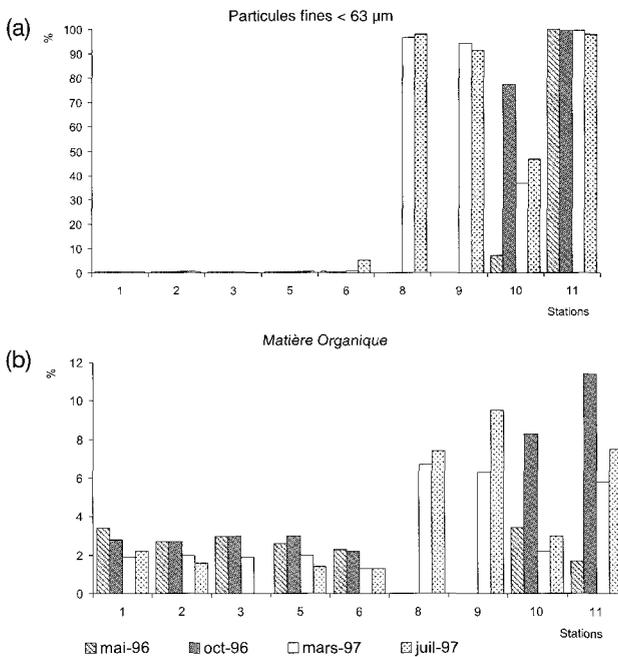


Figure 2 Distribution spatiotemporelle de la fraction fine < à $63 \mu\text{m}$ (a) et de la matière organique (b) au niveau de l'estuaire d'Oum Er-biâa.

Spatio-temporal distribution of the particular fraction < $63 \mu\text{m}$ (a) and organic matter (b) in the Oum Er-Biâa estuary.

2 – MÉTHODOLOGIE

Le sédiment est prélevé, au centre du chenal, c'est-à-dire à l'endroit le plus profond, à l'aide d'une benne de type Eckman lestée, durant quatre campagnes (mai 1996, octobre 1996, mars 1997 et juillet 1997). Lors des deux premières campagnes (mai et octobre 1996), les sédiments ont été prélevés au niveau de huit stations (1, 2, 3, 4, 5, 6, 10 et 11). En mars et en juillet 1997, trois nouvelles stations en zone vaseuse (7, 8 et 9) ont fait l'objet de prélèvements. Les stations 4 et 7 présentent des difficultés de prélèvement (1 seul prélèvement), en raison de la présence de galets (station 4) et dans une zone limite entre la zone

sableuse et la zone vaseuse à sédiment compact (station 7). La répartition spatiale des stations de prélèvement concerne l'ensemble de l'estuaire (*figure 1a*) : les plages de part et d'autre de l'embouchure (stations 1, 2 et 3), la zone sableuse (stations 4, 5 et 6), la zone limite entre le sable et la vase (station 7) et la zone vaseuse (stations 8, 9 et 10) et la station témoin à l'entrée de l'estuaire, au niveau de la digue (station 11). Les mêmes stations ont fait également l'objet d'un suivi de la qualité physicochimique des eaux. Les prélèvements d'eau ont été effectués à l'aide d'une bouteille de type Van Dorn (1 litre).

Au laboratoire et après séchage à 105 °C, le sédiment a fait l'objet des analyses suivantes :

- la granulométrie est réalisée selon la norme Afnor n° NFX 11504 et au granulomètre laser type Mastersizer 2000. La séparation par procédé électromagnétique de la magnétite et de l'hématite a permis l'évaluation de leurs concentrations au niveau de l'estuaire ;
- la matière organique est déterminée par calcination au four (3 h à 490 °C) ;
- les carbonates sont dosés à l'aide du calcimètre de Bernard. L'analyse de ces paramètres a été effectuée en trois essais au laboratoire et les résultats sont exprimés en valeurs moyennes, en pourcentage de poids sec ;
- le fractionnement, par chélation, du phosphore sédimentaire est effectué selon la méthode décrite par GOLTERMAN et BOOMAN (1988). Le phosphore total est également analysé sur des échantillons brutes par minéralisation (120 °C, 1 bar) au persulfate de potassium (RODIER, 1984). Les orthophosphates sont dosés par méthode colorimétrique (MURPHY et RILEY, 1962) ;
- la salinité des eaux est calculée à partir des teneurs en chlorures dosés au nitrate d'argent selon la formule : $S \text{ ‰} = 1,80655 \text{ Cl}$, adoptée par l'Unesco en (1952) et rapportée par plusieurs auteurs dans leurs ouvrages (AMINOT et CHAUSSEPIED, 1983 ; COPIN-MONTEGUT, 1996).

3 – RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les teneurs en phosphore total des sédiments de l'estuaire d'Oum Er-biâa (OEB) varient durant la période d'étude entre $0,40 \pm 0,04 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (station 10, mai 1996) et $0,82 \pm 0,07 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (station 5, mai 1996) (*figure 3*). La répartition spatiotemporelle ne montre aucune évolution qui pourrait être liée à celles de la fraction fine des sédiments ou de la matière organique observées dans l'estuaire d'OEB, alors qu'il est communément admis dans la littérature que ce sont les sédiments les plus riches en particules fines (argileux) qui sont les plus enrichis en phosphore total (LOYER, 1997 ; PIZARRO, 1992). La compréhension d'un tel comportement nécessite l'identification et la quantification des différents composantes du phosphore sédimentaire de l'estuaire. Le fractionnement révèle la dominance des formes minérales (75 % à 95 % du phosphore total) (*figure 3*).

La fraction calcique du phosphore sédimentaire (P-Ca) est la plus importante (*figure 3*), elle représente de 45 % (station 2, mai 1996) à 90 % (station 3,

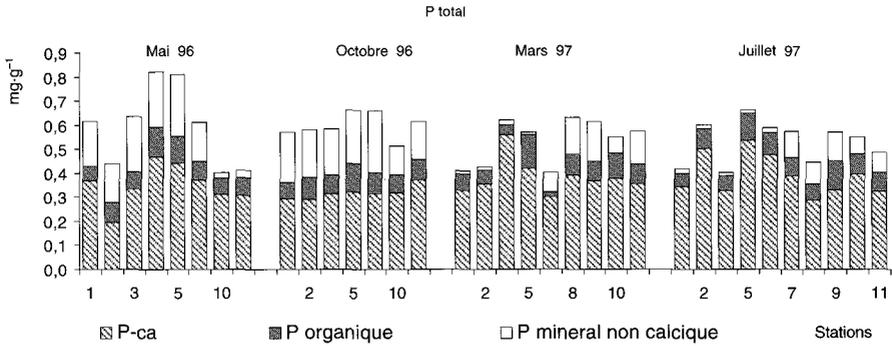


Figure 3 Distribution spatiotemporelle du phosphore lié au calcium P-Ca, du phosphore organique et du phosphore minéral non calcique au niveau de l'estuaire d'Oum Er-biâa.

Spatio-temporal distribution of the calcium phosphorus, of the organic phosphorus and the mineral not calcic phosphorus in the Oum Er-Biâa estuary.

mars 1997) du phosphore total des sédiments. Cependant, la majorité des échantillons traités (73 %) (*figure 3*) laisse apparaître des teneurs en phosphore calcique de l'ordre de $0,35 \pm 0,04 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ traduisant l'homogénéité spatiotemporelle de cette fraction dans les sédiments de l'estuaire.

La comparaison des teneurs en P-Ca et des pourcentages de carbonate de calcium (*figure 4*) des sédiments de l'estuaire, révèle une absence de corrélation entre ces deux paramètres. Ce type de résultat observé dans les systèmes paraliques est attribué par plusieurs auteurs (BERNER, 1975 ; KUO et MIKKELSEN, 1979), aux agents inhibiteurs, et principalement au magnésium (Mg^{2+}).

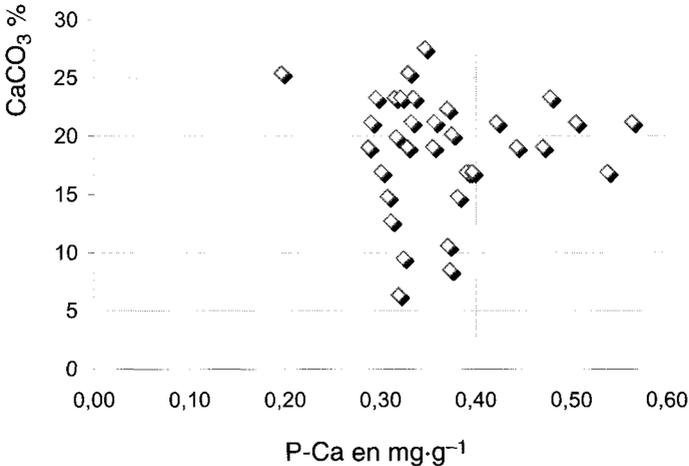


Figure 4 Relation entre le phosphore lié au calcium et les carbonates de calcium au niveau de l'estuaire d'Oum Er-biâa.

Relationship between the calcium phosphorus and the calcium carbonate in the Oum Er-Biâa estuary.

Par ailleurs, la constance relative des concentrations en P-Ca, au niveau de l'estuaire d'OEB, est, fort probablement, le résultat d'une forme du phosphore calcique majoritairement occluse dans une matrice cristalline (CHANG et JACKSON, 1957), peu sensible aux conditions physicochimiques du milieu, et notamment apatitique (Ca_5PO_4 , OH, F, Cl). À ce propos, M'HAMMDI (1990), a pu identifier aux rayons X la présence de minéraux phosphatés d'apatite (Ca_5PO_4) et de monazite (Ce-PO_4) au niveau des sables de l'embouchure. Les teneurs similaires en P-Ca ($0,35 \pm 0,03 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) rencontrées à l'entrée de l'estuaire (station 11) suggèrent un apport continental du phosphore calcique.

Le phosphore lié au fer (P-Fe) constitue la seconde réserve en phosphore sédimentaire, et représente, en moyenne, 20 % du phosphore total. Cette fraction est caractérisée par de grandes fluctuations temporelles (*figure 5*) comprises entre $0,01 \pm 1\cdot 10^{-3}\cdot\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (station 5, mars 1997) et $0,25 \pm 0,02 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (station 5, mai 1996), soit respectivement 8 % et 30 % du phosphore total. Les corrélations entre, d'une part, les teneurs en P-Fe et, d'autre part, les pourcentages de particules fines inférieures à $63 \mu\text{m}$ ($r^2 = 0,87$; $n = 9$, en mars et $r^2 = 0,92$; $n = 9$, en juillet) et la matière organique ($r^2 = 0,79$; $n = 9$, en mars et $r^2 = 0,90$; $n = 9$, en juillet) sont significatives. Cela indique que cette fraction est plus importante en zone vaseuse où elle est associée aux particules fines (argileuse) (stations 7, 8, 9, 10 et 11). En revanche, aux mois de mai et d'octobre, particulièrement en zone sableuse, les teneurs en P-Fe sont 10 à 16 fois plus élevées que celles des mois de mars et de juillet. (*figure 5*). Ces fluctuations temporelles du P-Fe ne s'accompagnent d'aucun changement au niveau des proportions de particules fines inférieures à $63 \mu\text{m}$, ou de matière organique des sédiments sableux, susceptible de justifier de telles observations. Cette situation semble donc conférer à l'estuaire un schéma de distribution spatiale du P-Fe inverse de celui de mars et de juillet, puisque les teneurs de P-Fe les plus élevées se retrouvent alors en zone sableuse et non plus en zone vaseuse. Par ailleurs, l'observation au microscope des sables concernés (stations 1 à 6) a révélé la présence notable (16 à 35 %) de minéraux lourds de nature titanifère. Ces minéraux ont également été mis en évidence par BERGER (1956) au niveau des plages atlantiques marocaines et par M'HAMMDI (1990) au niveau du littoral d'Azemmour. Ces minéraux sont formés principalement de magnétite ($\text{Fe}^{\text{II}}\cdot\text{Fe}^{\text{III}}_2\text{O}_4$) et d'hématite (Fe_2O_3) qui se concentrent au niveau de la zone sableuse avec des proportions représentant de 2,7 % (station 1, mars 1997) à 8,4 % (station 6, mars 1997) de l'échantillon total (*figure 6*). Or, ces minéraux présentent des pouvoirs d'adsorption des phosphates, qui semblent augmenter considérablement à des salinités élevées en raison de la présence de cations (*figure 7*). En effet, l'influence des cations sur les hydroxydes de fer a été mise en évidence en conditions expérimentales par GOLTHERMAN et DE GROOT (1994) pour le calcium et par GOMEZ (1996) pour les principaux cations d'eau de mer. GEORGEAUD (1997, 1999) a observé pour la magnétite des capacités d'adsorption vis-à-vis des cations toxiques Pb^{2+} et Cd^{2+} , bien supérieures à celles des hydroxydes de fer et d'aluminium.

Le phosphore organique résiduel (ROP) représente 2,1 % à 9,5 % du phosphore total sédimentaire, soit des teneurs en phosphore allant de $0,003 \pm 4\cdot 10^{-4} \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (station 3, mars 1997) à $0,071 \pm 8\cdot 10^{-3} \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (station 9, juillet 1997) (*figure 8*). Le comportement spatiotemporel de cette fraction montre globalement une forte similitude avec celui du P-Fe (*figure 5*), ce qui suggère que les mêmes phénomènes régissent ces deux fractions à l'interface eau-sédiment. En effet, aux mois de mars et de juillet, cette fraction est corrélée significative-

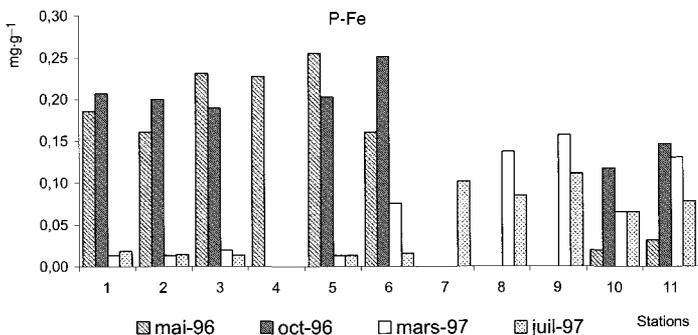


Figure 5 Distribution spatiotemporelle du phosphore lié au fer au niveau de l'estuaire d'Oum Er-biâa.

Spatio-temporal distribution of the iron phosphorus in the Oum Er-Biâa estuary.

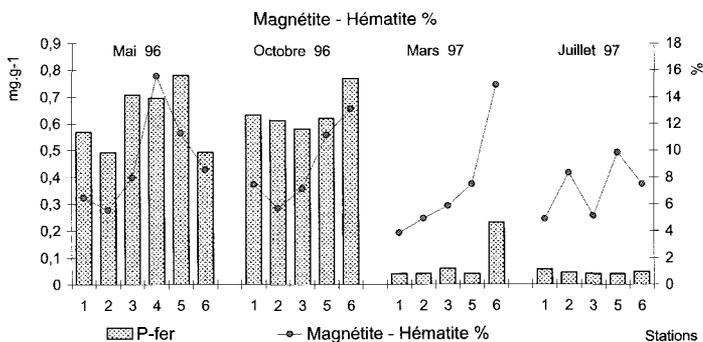


Figure 6 Distribution spatiotemporelle de la magnétite et de l'hématite au niveau de l'estuaire d'Oum Er-biâa.

Spatio-temporal distribution of the magnetite and the hematite in the Oum Er-Biâa estuary.

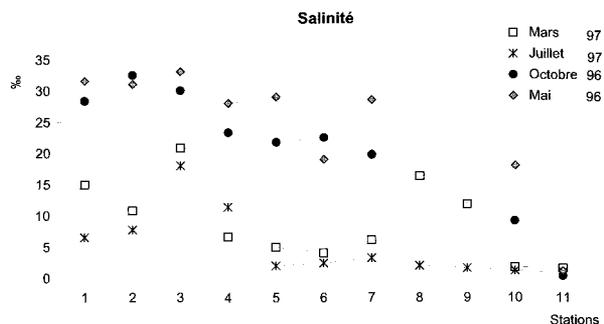


Figure 7 Distribution longitudinale de la salinité des eaux du fond au niveau de l'estuaire d'Oum Er-biâa.

Spatio-temporal distribution of the salinity in the Oum Er-Biâa estuary.

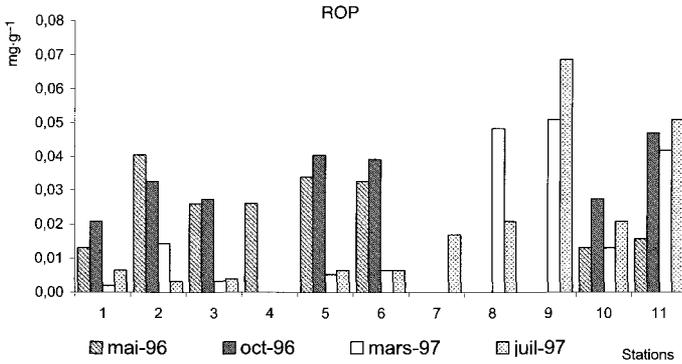


Figure 8 Distribution spatiotemporelle du phosphore organique résiduel au niveau de l'estuaire d'Oum Er-biâa.

Spatio-temporal distribution of the residual organic phosphorus in the Oum Er-Biâa estuary.

ment à l'importance relative des particules fines ($r^2 = 0,93$; $n = 9$, en mars ; $r^2 = 0,70$; $n = 9$, en juillet) et de la matière organique ($r^2 = 0,95$; $n = 9$, en mars ; $r^2 = 0,80$; $n = 9$, en juillet). Par conséquent, les plus fortes valeurs du ROP se trouvent dans la zone vaseuse. En revanche, en mai et en octobre les valeurs les plus élevées se retrouvent dans la zone sableuse, comme pour le P-Fe. Ceci peut s'expliquer par la formation de complexes « matière organique-oxyde de fer-phosphate », explication suggérée également par plusieurs auteurs (GOLTERMAN, 1995 ; MESNAGE, 1994 ; SUZUKI *et al.*, 1992). Lors du fractionnement du phosphore, ces complexes sont extraits en phase tardive avec la matière organique.

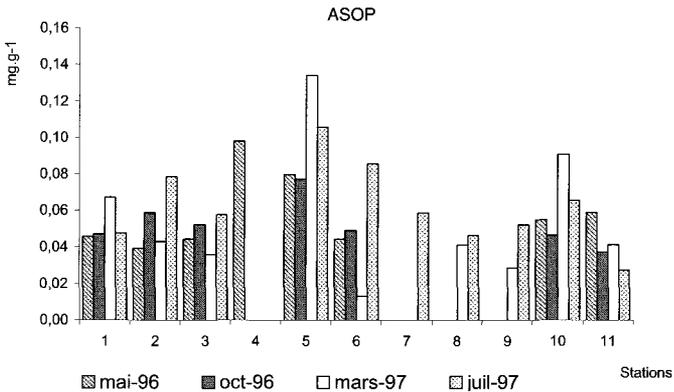


Figure 9 Distribution spatiotemporelle du phosphore organique soluble à l'acide au niveau de l'estuaire d'Oum Er-biâa.

Spatio-temporal distribution of the acid soluble organic phosphorus in the Oum Er-Biâa estuary.

Le phosphore organique soluble à l'acide (ASOP) représente 6 % à 15 % du phosphore total, soit $0,013 \pm 3 \cdot 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (station 6, mars 97) à $0,132 \pm 2 \cdot 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (station 5, mars 1997) de phosphore (figure 9). Cette fraction n'est liée par aucune corrélation apparente avec les autres fractions et ne présente aucune évolution temporelle significative. Sur un plan longitudinale, les teneurs les plus élevées s'observent au niveau des effluents d'eaux usées, déversées dans l'estuaire sans traitement préalable (au niveau de la station 5) et qui se diluent le long de l'estuaire au rythme des marées.

Les concentrations en phosphore soluble (labile), ne dépassent qu'exceptionnellement $0,013 \pm 1 \cdot 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, soit moins de 3 % du phosphore total sédimentaire. La distribution de cette fraction, le long de l'estuaire, reflète celle des particules fines < à $63 \mu\text{m}$ (figure 10). Selon HALLBERG (1992) cette fraction est d'autant plus importante que la surface spécifique des particules est grande, cette dernière étant inversement proportionnelle au diamètre des particules.

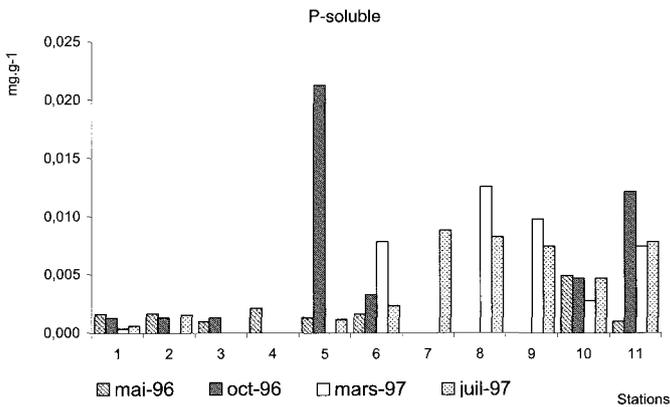


Figure 10 Distribution spatiotemporelle du phosphore soluble au niveau de l'estuaire d'Oum Er-Biâa.

Spatio-temporal distribution of the soluble phosphorus in the Oum Er-Biâa estuary.

4 – CONCLUSION

L'étude des formes du phosphore sédimentaire dans l'estuaire d'OEB a mis en évidence la dominance et une relative stabilité de la fraction calcique, ce qui lui confère un caractère non biodisponible dans l'espace et dans le temps. Ceci est attribué au fait que cette forme de phosphore est majoritairement sous forme particulaire inerte, apatitique.

Le phosphore lié au fer (P-Fe) et à la matière organique résiduelle (ROP) représente, en moyenne, 30 % du phosphore total. Ces deux fractions sont les formes biodisponibles du phosphore sédimentaire dans l'estuaire d'Oum Er-Biâa. Elles montrent un double comportement dépendant principalement de la nature des sédiments et de la salinité au niveau de l'estuaire. En effet, les formes du phosphore lié à la fraction fine et à la matière organique se retrou-

vent en amont de l'estuaire (zone vaseuse) et leur biodisponibilité serait fonction des processus de productivité organique et de minéralisation à l'interface eau-sédiment. En aval de l'estuaire (zone sableuse), le phosphore biodisponible (P-Fe, ROP) est lié aux minéraux d'oxyde de fer, principalement à la magnétite, et aux complexes organométalliques. Les variations du phosphore (P-Fe et ROP) à ce niveau, sont en relation avec les fluctuations importantes et fréquentes de la salinité. La morphométrie (barrière sableuse) et l'hydrodynamisme au niveau de l'estuaire, atténuent les effets de la remontée des marées et accentuent, par conséquent, l'impact des apports d'eau douce, lors des lâchers d'eau des barrages situés plus en amont.

La fraction du phosphore organique soluble à l'acide (ASOP), qui représente, en moyenne, 10 % du phosphore total du sédiment, aurait pour origine les apports continuels d'eaux usées brutes de la ville d'Azemmour. Cette fraction est sans doute constituée de chaînes de polyphosphates hydrolysables par les bactéries.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AMINOT A., CHAUSSEPIED M., 1983. Manuel des analyses chimiques en milieu marin. CNEXO, BND, Brest, 395 p.
- BERGER G., 1956. Étude des sables noirs des plages atlantiques du Maroc. *Not. et Mém. Serv. Géol., Maroc*, n° 133, t. 14, 12 p.
- BERNER R.A., MORSE J.W., 1974. Dissolution kinetics of calcium carbonate in seawater IV. Theory of calcite dissolution. *Am. J. Sci.*, 274, 108-134.
- BERNER R.A., 1976. The solubility of calcite and aragonite in seawater at one atm. Pressure and 34.5 parts per thousands. *Am. J. Sci.*, 276, 713-730.
- CHANG S.C., JACKSON M.L., 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil. Sci.*, 94, 133-144.
- COPIN-MONTEGUT G., 1996. Chimie de l'Eau de Mer, *Institut Océanographique*, coll. Synthèses, Mollusques, Paris, 319 p.
- GEORGEAUD V.M., ROCHETTE P., AMBROSI J.P., VANDAMME D., WILLIAMSON D., 1997. Relationship between heavy metals and magnetic properties in a large polluted catchment: the Etang de Berre (South of France). *Phy.Chem.Ear.*, 22/1-2, 211-214.
- GEORGEAUD V., 1999. Adsorption des métaux lourds sur les oxydes magnétiques vers des procédés magnétiques de décontamination et d'expertise des sites pollués. *Th. Doct. Univ. Aix-Marseille III*, 219 p.
- GOLTERMAN H.L., 1995d. The role of iron-hydroxide-phosphate-sulfide system in the phosphate exchange between sediments and overlying water. *Hydrobiologia*, 297, 34-54.
- GOLTERMAN H.L., BOOMAN A., 1988. Sequential extraction of iron-phosphate and calcium-phosphate from sediments by chelating agents. *Verh.Int.Verein. Limnol.*, 23, 904-909.
- GOLTERMAN H.L., DE GROOT C.J., 1994. Nouvelles connaissances des formes du phosphate : conséquences sur le cycle du phosphate dans les sédiments des eaux douces peu profondes. *Annals. Limnol.*, 30, 221-232.
- GOMEZ HERNANDEZ M.E., 1996. Rôle des sédiments dans l'eutrophisation d'une lagune littorale méditerranéenne, étang de Méjean, Hérault. Echange du phosphate entre le sédiment et l'eau en fonction des conditions environnementales. *Th. Doct. Univ. Montpellier I*, 178 p.
- HALLBERG R.O., 1992. Sediments: their interaction with biogeochemical cycles

through formation and diagenesis. In: BUTCHER S.S. (Ed.), *Global Biogeochemical cycles*, Academic Press, Harcourt Brace Jovanovich, London.

- KUO S., MIKKELSEN D.S., 1979. Effect of magnesium on phosphate adsorption by calcium carbonate. *Soil. Sc.*, 127 (2), 65-69.
- LOYER F.A., 1997. Les formes de phosphore particulaire et sédimentaire en environnement côtier, méthodes d'analyse, biodisponibilité, échange. *Th. Doct. Univ. Bretagne Occidentale*, Ifremer-centre de Brest, 329 p.
- MESNAGE V., 1994. Contribution à l'étude de la mobilité des formes de phosphate à l'interface eau-sédiment dans les écosystèmes lagunaires. *Th. Doct. Univ. Montpellier I*, 253 p.
- M'HAMMDI N., 1990. Étude sédimentologique et minéralogique des sables titanifères du littoral d'Azemmour à l'embouchure de l'Oum Er Rbia. *Rapp sci. Serv. Géol. Maroc*, 60 p.
- MURPHY J., RILEY J.P., 1962. A modified single solution for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta.*, 24, 31-36.
- PIZARRO M.J., HAMMELY J., MAINE A.M., 1992. Phosphate adsorption on bottom sediment of the Rio de la Plata. *Hydrobiologia*, 228, 43-54.
- RODIER J., 1984. L'analyse de l'eau, 7^e édition, Dunod, Paris, 1135 p.
- SUSIKI T., INOMATA S., SAWADA K., 1986. Adsorption of phosphate on calcite. *J. Chem. Soc. Faraday Trans.*, 82, 1733-1743.