

Contribution à l'étude de la qualité des eaux de la lagune de Nador : Impact de l'anthropisation

Contribution to the study of the Nador lagoon's water quality: Anthropogenic impact

Zahra ZERROUQI^{1*}, Mohammed SBAA², Abdelhafid CHAFI³ & Hicham AQIL²

1. Centre régional des métiers de l'éducation et de formation, Avenue Hay Al Massira, B.P. 60010, Oujda, Maroc. *(zenviron@yahoo.fr)
2. Centre de l'Oriental des Sciences et Technologies de l'eau, Bd. M^{ed} VI, B.P. 717, Oujda, Maroc.(mohsbaa@yahoo.fr;aqil_hch@yahoo.fr)
3. Université Mohamed Premier, Laboratoire d'Hydrobiologie et Ecologie générale, Départ. de Biologie, Faculté des Sciences, B.P. 717, Oujda, Maroc. (chafihafid@yahoo.fr)

Résumé. Dans ce travail, on a essayé d'appréhender l'impact anthropique sur la lagune de Nador (NE Maroc) à partir de l'étude de la qualité de ses eaux. Les fortes teneurs en NH₄, NO₂ et NTK sont notées dans la zone étalée du point de rejet de la station d'épuration (STEP) de Nador à Tirekaa. Ce fait peut être expliqué par les rejets des eaux usées mal traitées de cette STEP, les eaux usées brutes drainées par l'oued Caballo et l'impact des déchets solides. En appliquant l'Analyse en composantes principales et le système d'information géographique, la zone touchée par la pollution azotée est estimée à environ 16,8 km². Les concentrations les plus élevées en PO₄ et PT sont enregistrées près de Béni Ensar et de Kariat Arekman et peuvent être interprétées en partie par les rejets permanents des eaux usées brutes et qui activent la croissance des algues dans cette zone. Par ailleurs, l'analyse des métaux lourds a révélé l'enrichissement des eaux de la zone de Nador en Zn et Cd et des eaux de Kariat Arekman en Ni, Cr et Cu.

Mots-clés : Lagune de Nador, eaux usées, impact anthropique.

Abstract. The Nador lagoon is located on the Mediterranean coast of Morocco. It receives daily several pollutants from different sources that are linked to fish farming, water waste treatment and tourism. To determine whether these potential sources of pollution have deleterious effects on water quality, we determined the nature and the quantity of several pollutants present in the Nador lagoon waters. The preliminary results indicate high contents in NH₄, NO₂ and TKN in the spread of the discharge of the treatment station of Nador (TSN) to Tirekaa village. By applying the principal component analysis and the geographical information system, the area affected by nitrogen pollution is estimated at about 16,8 km². Furthermore, the highest concentrations of PO₄ and TP were noted near Beni Ensar town. In addition, the analysis of water for heavy metals showed Nador's water is rich in Zn and Cd, while the Kariat Arekmane's water is rich in Ni, Cr and Cu. This build up of pollutants in NE waters is primarily due to the effluent of sewage that are inappropriately treated at the station, and to the permanent discharges of untreated sewed water that is drained by the Caballo wadi. All these sources of pollutions have contributed to the degradation the quality of Nador Lagoon waters. Thus, appropriate measures are required to avoid further pollution of the lagoon.

Keywords : Nador lagoon, sewage, human impact.

Abridged English version

The Nador lagoon also called Marchica is the largest Moroccan lagoon and the second big Lagoon of North Africa. It is located on the west coast of the Mediterranean Sea with a surface of 115 km². Nador lagoon which is a site of biological, ecological and economic interest has a respective length and width of around 25 km and 7,5 km. It is a semi-enclosed basin that receives significant loads of pollutants from natural and anthropogenic origin drained through by drainage basin. The main objectives of this work are determining the spatial distribution of physical and chemical parameters of the lagoon waters to approach the real risk of pollution and a specification of chemical pollutants and their potential sources. For the study of water lagoon quality a total of 16 samples were selected (Fig. 1). The samples were collected at 50 cm of bottom margin. The physical parameters of water (temperature, salinity and electrical conductivity), pH and dissolved oxygen were measured in situ. The collected water samples were subject to another

analysis: ammonium NH₄ (NF T90-015), nitrites NO₂ (NF T90-013), total kjeldhal nitrogen (TKN) (NF T90-1 10), phosphates (PO₄) and total phosphorus (TP) (NF T 90-023). The analysis of dissolved heavy metals was carried out by Inductively Coupled Plasma emission spectrometry (ICP-AES). The statistical analysis was used to detect significant correlations between various parameters. To study the relationship between variables and their possible distribution, the principal component analysis (PCA) method was used. The spatial variations of physical and chemical parameters of water are determined based on the Geographic Information System (GIS). The method of interpolation is the inverse distance weighting (IDW).

Our preliminary results indicate high contents in NH₄, NO₂ and TKN in the spread of the discharge of the treatment station of Nador (TSN) to Tirekaa village (Fig.2) which can be primarily attributed to sewage outflows of TSN poorly treated. To this is added the impact of sludge dry stock of TSN located on the banks of the Nador

lagoon. Raw sewage drained by Caballo wadi, which are rich in nitrogen and solid waste which are accumulated on the coast and carried by the wadi or by the soil leaching during rainy spells, are not without effect. By applying the PCA and the GIS, the area affected by nitrogen pollution is estimated at about 16,8 km² (Fig.4). Furthermore, the highest concentrations of PO₄ and TP were noted near Beni Ensar and Kariat Arekman towns (Fig. 2) covering an estimated area of 8,5 km² and may be

interpreted in part by the permanent discharges of raw sewage which activate the growth of algae in this area. In addition, the analysis of water for heavy metals showed Nador's water is rich in Zn and Cd, while the Kariat Arekman's water is rich in Ni, Cr and Cu (Fig. 5).

In the perspective of protecting the Nador lagoon, the treatment of pollution sources is the best way to improve water quality and prevent coastal pollution.

INTRODUCTION

Les lagunes côtières peu profondes, interface entre le continent et la mer, sont les écosystèmes les plus productifs de la biosphère (Abreu *et al.* 1994). Elles représentent une petite partie de la surface couverte par les océans, mais elles sont malgré tout caractérisées par une grande biodiversité et une productivité primaire intense (Nixon 1982). Les lagunes littorales manifestent en plus une grande variabilité spatiale et temporelle des caractéristiques physico-chimiques de leurs eaux due aux mélanges des eaux douces avec les eaux marines (Piccini 2006).

Les systèmes lagunaires sont extrêmement vulnérables aux quantités de polluants qu'ils reçoivent à partir de sources différentes. L'activité humaine a été la source d'une variété d'impacts sur les masses d'eaux avec des conséquences perturbatrices de l'équilibre naturel. En plus des activités humaines terrestres : agriculture, tourisme, industrie, les lagunes sont le point de rencontre des activités humaines marines : pêche, baignade, yachting, aquaculture et cette pression risque de croître avec l'augmentation de la population (Plus *et al.* 2006).

Une part significative des quantités annuelles de polluants est exportée par les rivières durant les précipitations (Meybeck *et al.* 1992). Les quantités importantes en azote peuvent conduire à une eutrophisation progressive de la lagune (Kjerfve 1994).

Les charges en azote apportées par l'atmosphère constituent une bonne part de la charge totale en azote dans les environnements côtiers (Burian *et al.* 2001). Les eaux de précipitations contiennent de l'azote sous différentes formes. Les inputs brusques d'azote peuvent causer une eutrophisation locale mais importante et nuisible des lagunes. L'impact de l'enrichissement en azote a été démontré dans les lagunes méditerranéennes.

Par ailleurs, les lagunes côtières sont sous l'influence marine. Les volumes d'eaux échangées entre la lagune et la mer sont associés à des éléments dissous et particulaires. Les principaux objectifs de ce travail sont la détermination de la distribution spatiale des paramètres physico-chimiques des eaux de la lagune de Nador afin d'approcher le risque réel de pollution et la spécification chimique des éléments polluants et de leurs sources potentielles.

SITE D'ETUDE

La lagune de Nador appelée également Sebkhia de Bou Areg ou Marchica (Fig. 1) est la plus grande lagune marocaine et la deuxième grande lagune nord-africaine. Elle est située sur la côte Ouest de la méditerranée avec une

surface de 115 km² et une profondeur maximale de l'ordre de 8 m au centre et qui diminue vers la rive. La température moyenne varie de 13,6 °C en hiver à 30,5 °C en été (Bloundi 2005). Le vent dominant est de direction WSW de novembre à mai et de ENE de Mai à octobre (Tesson 1977; Guélorget *et al.* 1987 ; Mahjoubi 2001 ; Hilmi 2005).

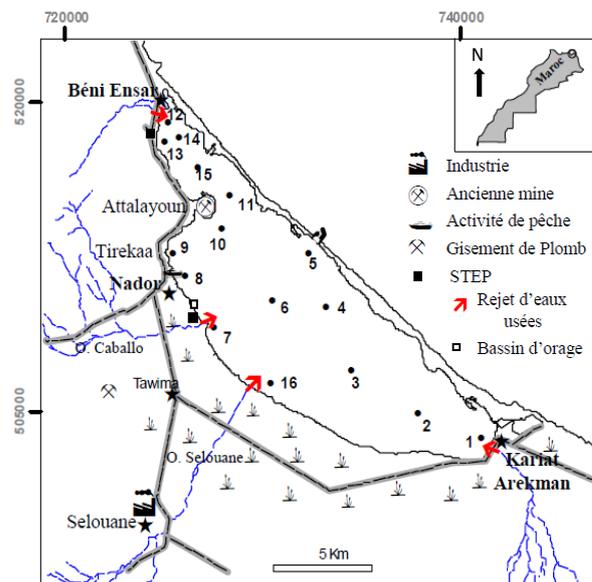


Figure 1. Zone d'étude et localisations des points d'échantillonnage
Figure 1. Studied zone and sampling sites

La lagune de Nador qui représente un site d'intérêt biologique et écologique de par sa richesse, sa biodiversité et son intérêt économique, présente respectivement une longueur et une largeur de l'ordre de 25 km et 7,5 km. C'est un bassin semi-fermé qui reçoit d'importantes charges de polluants d'origine naturelle et anthropique drainées par les eaux de son bassin versant. La frange continentale, plaine de Bou Areg est caractérisée par plusieurs oueds intermittents dont certains servent d'effluents d'eaux usées des zones urbaines situées en amont et dont les plus importants sont l'oued Selouane et l'oued Caballo. Les activités socio-économiques les plus importantes de cette zone et qui peuvent être des sources potentielles de pollution sont reliées à :

- l'agriculture avec une dominance de la céréaliculture au Sud- Est (Dakki 2004),
- l'industrie localisée principalement dans deux zones Selouane et Nador (CCISN 2006),
- la pêche artisanale exercée avec près de 400 barques dont la plupart sont motorisées et l'aquaculture installée depuis près de 20 ans (MedWetCoast 2003),

- le tourisme qui est en plein développement suite à l'attraction du site de la plage de Marchica et de Kariat Arekman.

La lagune de Nador reçoit également les eaux traitées de la station d'épuration (STEP) de Nador et de Béni Ensar. La STEP de Nador qui offre un traitement biologique par boues activées suivi par un lagunage de maturation et le lagunage naturel de Béni Ensar souffrent d'un bon nombre de dysfonctionnements qui mettent en cause leurs performances épuratoires. La lagune de Nador qui se voit fragilisée par ces rejets d'eaux usées, est sujette à d'autres types de nuisances, que ce soit par les déchets solides stockés ou évacués sur ses rives ou bien les eaux de ruissellement acheminées directement dans ses eaux, et se trouve par conséquent exposée à un sérieux problème d'eutrophisation (Motia & Al Madani 2006).

MATERIEL ET METHODES

Un total de 16 échantillons est sélectionné pour l'étude de la qualité des eaux de la lagune de Nador (Fig.1). Les échantillons ont été prélevés en juin 2006 au niveau de la couche 50 cm d'eau. La température, la salinité et la conductivité électrique sont mesurées in situ à l'aide d'un conductimètre de type Cond 315i/SET, calibré avec une solution standard (84 et 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Le pH est mesuré avec un pH mètre de type pH 315i/SET, l'oxygène dissous par un oxymètre de type Ox 315i/SET.

Les échantillons d'eaux prélevés ont fait l'objet d'autres analyses : L'ammonium NH_4 (NF T90-015), les nitrites NO_2 (NF T90-013), l'azote total kjeldhal (NTK) (NF T90-110), l'orthophosphate (PO_4) et le phosphore total (PT) (NF T 90-023). L'analyse des métaux lourds dissous (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) a été effectuée par Inductively Coupled Plasma emission spectrometry (ICP- AES) en utilisant un spectromètre de type JY. Ultima 2 et dont les limites de détection en ppm sont de l'ordre de 0,00027 pour le Cd ; 0,0009 pour le Cr, le Cu et le Zn ; 0,0012 pour le Ni et 0,00045 pour le Pb. L'analyse des métaux lourds a été effectuée à l'UATRS (Unités d'Appui Technique à la Recherche Scientifique) qui constitue une division relevant du CNRST.

L'analyse statistique a été utilisée pour détecter les corrélations significatives entre les différents paramètres. Pour étudier les relations entre les variables et leur possible mode de distribution, on a utilisé l'analyse en composantes principales (ACP). L'ACP est appliquée pour identifier la pollution potentielle et ses éléments caractéristiques. Elle a été utilisée dans plusieurs études (Mendiguchía *et al.* 2007 ; Daniel 2004 ; Zhou *et al.* 2007a ; Simeonov *et al.* 2001 ; Rigollet *et al.* 2004). Les données ont été traitées en utilisant le logiciel SPSS 10.

Les variations spatiales des paramètres physico-chimiques de l'eau sont déterminées en se basant sur le système d'information géographique (SIG). La méthode d'interpolation est l'inverse distance weighting (IDW). Cette méthode est plus simple et pratique et a été déjà utilisée dans l'étude des sols (Zerrouqi *et al.* 2008), des sédiments et de l'eau (Zhou *et al.* 2007b, Arid *et al.* 2005).

Plusieurs études ont combiné les techniques du système d'information géographique (SIG) et l'ACP pour appréhender

l'impact anthropique dans les différentes zones (Zhou *et al.* 2007a).

RESULTATS ET DISCUSSION

Température, salinité, conductivité électrique, pH, O_2

La température des eaux de la lagune de Nador oscille entre 22,1 et 26,3 °C. La salinité varie de 37,2 à 37,9 ‰ et la conductivité électrique fluctue entre 56,2 et 57 mS/cm. Les valeurs les plus élevées pour ces deux derniers paramètres sont enregistrées près de Kariat Arekman et de Béni Ensar et sont en concordance avec les résultats des travaux d'Abouhala *et al.* (1995), de Bloundi (2005) et de Ruiz *et al.* (2006). Ces deux zones confinées, caractérisées par leur faible profondeur et leur faible hydrodynamisme, sont sujettes à une intense évaporation, principale cause de leur sursalinitation. Les salinités les plus faibles sont observées près des effluents d'eaux douces.

Le pH de l'eau de mer varie généralement de 7,5 à 8,5 et est influencé par la température et les activités de photosynthèse et de la respiration des microorganismes (Harvey 1955). Les données recueillies du pH montrent des valeurs oscillantes entre 8,2 et 8,84 et qui sont similaires à celles trouvées par Lefèvre *et al.* (1996). La majorité des valeurs de pH mesurées sont dans la marge normale avec des valeurs maximales enregistrées au voisinage de Béni Ensar (8,84) et de Kariat Arekman (8,61) ce qui peut être attribué à des apports plus importants en ions carbonates à ces niveaux. En outre, les fortes valeurs de pH dans ces zones peuvent être expliquées par la croissance des algues et la diminution du CO_2 qui est corrélée négativement au pH (Elmanama *et al.* 2006).

L'oxygène dissous (O_2) varie de 6,6 à 11,2 mg/l pendant la période d'étude avec des valeurs maximales enregistrées à Béni Ensar (11,2 mg/l) et qui peuvent être expliquées par l'intense activité photosynthétique des algues développées dans cette zone. Au niveau de cette zone, une prolifération importante d'algues créant des gênes pour les riverains a été observée in situ, particulièrement dans les stations 12 et 13 témoignant de l'eutrophisation de la zone. Après la mort de ces algues, il se produit un développement des bactéries décomposeurs qui consomment de l' O_2 dissous dans l'eau et une situation d'hypoxie s'installerait alors. Les valeurs minimales d' O_2 (6,6 mg/l) sont notées près du point de rejet de la STEP de Nador caractérisé aussi par une accumulation de la matière organique (Guelorget & Perthuisot 1983 ; El Alami *et al.* 1998).

Ammonium (NH_4), Nitrites (NO_2), Phosphates (PO_4), Phosphore total (PT) et Azote total Kjeldhal (NTK)

Les concentrations moyennes des composés azotés et phosphorés montrent des intervalles de 0,005-0,015 ; 0,014-0,047 ; 0,005-0,162 ; 0,030-0,242 et 0,2-0,89 mg/l respectivement pour NH_4 , NO_2 , PO_4 , PT et NTK. Les concentrations de l'ammonium (NH_4) et du phosphate (PO_4) sont inférieures à celles trouvées par Bloundi (2005) et supérieures à celles trouvées par Ruiz *et al.* (2006). L'étude des sels nutritifs est très intéressante. En effet, ce sont ces éléments qui activent la production primaire dans les écosystèmes aquatiques. Un enrichissement en sels

nutritifs se traduit par l'accroissement de la biomasse végétale.

Il existe deux sources principales de nutriments : les effluents d'eaux usées urbaines et industrielles et les eaux de ruissellement (Pinckney *et al.* 2001). L'identification des différentes sources d'azote et l'évaluation de leur contribution rendent possible la définition des mesures qui doivent être prises pour réduire le phénomène d'eutrophisation (Ryding & Rast 1992).

Les fortes teneurs en NH_4 , NO_2 et NTK ont été notées dans la frange étalée du point de rejet de la STEP de Nador à Tirekaa (Fig. 2) ce qui peut être essentiellement attribué aux rejets d'eaux usées mal traitées de la STEP de Nador, riches en azote (61 mg/l de NTK, 43,6 mg/l de NH_4)

(Zerrouqi 2009). En effet, cette station souffre d'un bon nombre de problèmes en relation avec le manque d'entretien des équipements et la dégradation du génie civil des bassins d'aération et des bassins de maturation et qui sont responsables de la forte baisse de son rendement épuratoire. A ceci s'ajoute l'impact des stocks à l'air libre de boues sèches de cette STEP et qui sont localisés sur les berges de la lagune proche de cette dernière. Au cours de la période pluvieuse, ces boues sèches, très riches en azote (4,2 % NTK, 921 mg/l NO_3 , 66,8 mg/l NH_4) (Zerrouqi *et al.* 2011) sont lessivées par les eaux de pluies. Les eaux de lixiviation de ces déchets peuvent facilement affecter la nappe superficielle de Bou Areg, se diffuser dans la lagune et enrichir ses eaux en azote.

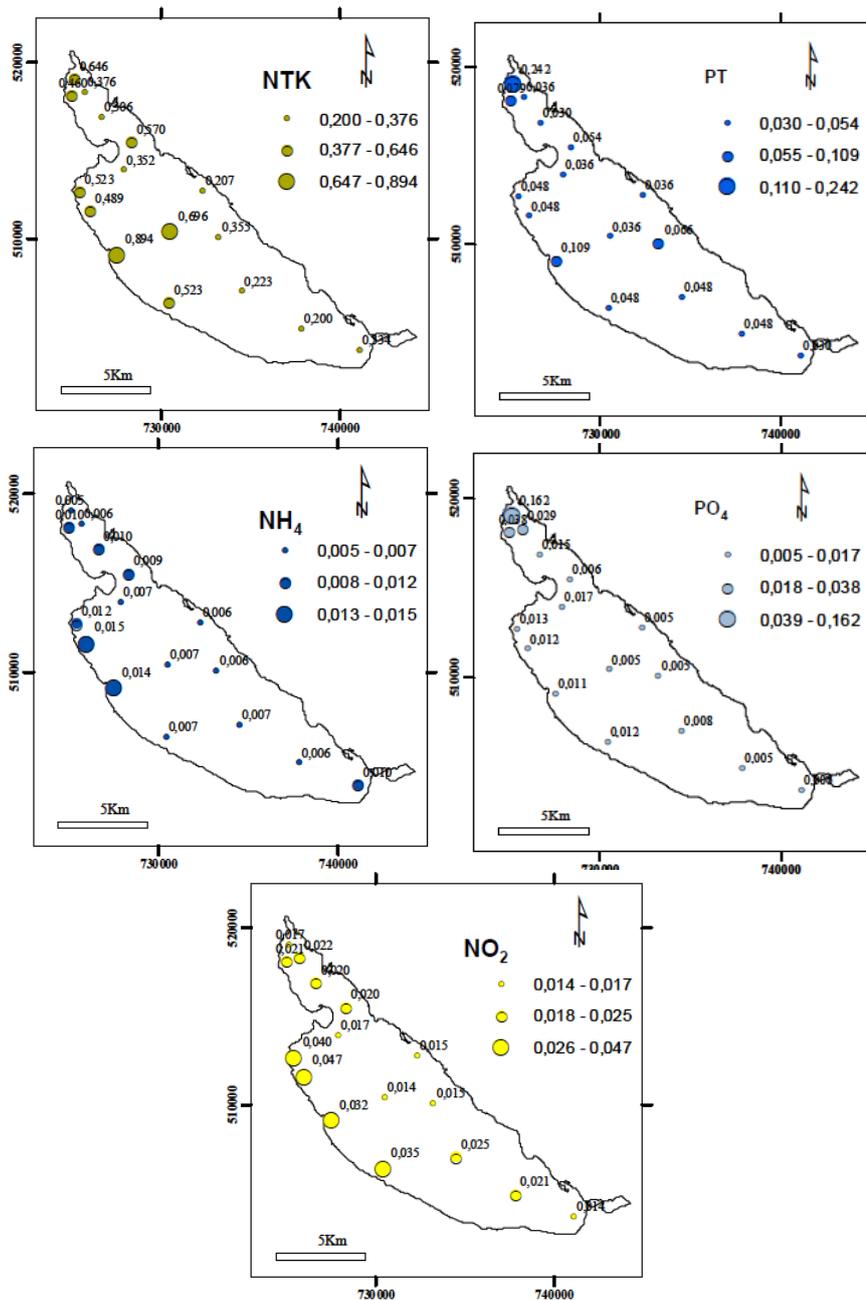


Figure 2. Distribution spatiale de NTK, NH_4 , NO_2 , PO_4 et PT dans les eaux de la lagune de Nador (mg/l)
 Figure 2. Spatial variations of TKN, NH_4 , NO_2 , PO_4 and TP in the sampling stations of lagoon water

Les rivières qui débouchent dans la lagune peuvent représenter une large part de la charge d'azote de la lagune ou des zones côtières (Nedwell *et al.* 2002). En effet, les eaux usées brutes drainées par l'oued Caballo qui sont riches en azote (25,2 mg/l de NTK, 8,5 mg/l de NH_4) (Zerrouqi 2009), et les déchets solides entraînés par cet oued, soit par drainage ou lessivage des sols lors des épisodes pluvieux et accumulés sur la côte, ne sont pas sans effet. Les eaux de ruissellement drainées constituent une autre source d'azote pour la lagune (Tournoud *et al.* 2006). L'azote issu de ces sources peut avoir un fort impact sur la lagune à cause de la distance faible entre la source de pollution et la lagune. Au niveau de la zone de Nador, les eaux de ruissellement évacuées par le bassin d'orage à Chaâla, pendant la période pluvieuse, constitueraient une autre source d'azote qui entraîne une croissance d'algues et donc une eutrophisation comme c'est le cas à Béni Ensar.

En comparaison avec d'autres milieux littoraux (Tab. 1), les eaux de la lagune de Nador montrent des concentrations en NH_4 bien inférieures à celles des lagunes d'El Maleh (Ruiz *et al.* 2004), de Vistonis (Markou *et al.* 2007), de la baie d'Izmir (Kontas *et al.* 2004) et de l'estuaire de Changjiang (Xiao *et al.* 2007) et supérieures aux valeurs enregistrées à la lagune d'El Oualidia (Bennouna 1999).

En général l'excès en phosphates entre dans l'eau à partir des stations d'épuration des eaux usées et à partir des sols. Les concentrations les plus élevées en PO_4 et PT sont notées à Béni Ensar (0,162 mg/l de PO_4 et 0,242 mg/l de PT) (Fig. 2). Ceci renforce le rôle proposé du phosphore dans le processus d'eutrophisation de cette zone qui est particulièrement caractérisée par une croissance de macroalgues du genre *Enteromorpha* et *Chaetomorpha* observées in situ. Dans cette zone, toutes les conditions sont réunies pour que ces algues se multiplient dans la masse d'eau. En effet, la conjugaison de plusieurs facteurs tels que le bon éclaircissement pendant la période estivale, la température élevée, la faible profondeur et le faible hydrodynamisme, favorise la croissance de ces algues dans cette zone. Cependant, les rejets permanents d'eaux usées brutes, du fait du mauvais fonctionnement de la STEP de Béni Ensar, restent le facteur principal.

Les teneurs en phosphates (PO_4) des eaux lagunaires de Nador sont inférieures à celles trouvées par Inani (1995) et Daoudi *et al.* (2012). Par ailleurs, elles sont en concordance avec celles retrouvées à la lagune de Thau (Souchu *et al.* 1998) et de Vistonis et supérieures à celles notées à la lagune d'El Oualidia et la baie de Flamengo (Povinec *et al.* 2008). Elles sont cependant inférieures aux valeurs observées à la lagune El Maleh, la baie d'Izmir et l'estuaire de Changjiang (Tab. 1).

En considérant les critères de base N- NH_4 et P- PO_4 des classes d'eutrophisation, adoptés par Kitsiou et Karydis (1998) (Tab. 2), les eaux de la lagune de Nador se retrouvent dans le domaine d'eutrophie. L'eutrophisation est de plus en plus importante surtout dans les extrémités de la lagune et dans la bordure continentale (MATEE 2005).

L'ACP a été appliquée sur les teneurs des eaux de la lagune de Nador en NH_4 , NO_2 , PO_4 , PT et NTK et sur les variables pH, température, salinité et O_2 . L'inertie portée

par les deux facteurs est de 76,2 %, soit 48,5 % pour le facteur F1 et 27,7 % pour le facteur F2.

A l'axe F1, contribuent positivement les éléments PO_4 , PT, O_2 ainsi que les paramètres pH, température et salinité. Par contre, l'axe F2 est défini surtout par les éléments NH_4 , NO_2 et NTK qui y contribuent positivement (Fig.3).

Tableau 1 : Comparaison des concentrations en PO_4 et NH_4 (mg/l) dans la lagune de Nador avec d'autres milieux littoraux (1 : Présente étude ; 2 : Bennouna 1999 ; 3 : Ruiz *et al.* 2004 ; 4 : Markou *et al.* 2007 ; 5 : Kontas *et al.* 2003 ; 6 : Povinec *et al.* 2008 ; 7 : Xiao *et al.* 2007 ; 8 : Souchu *et al.* 1998).

Table 1. The concentrations of PO_4 and NH_4 (mg/l) in Nador lagoon compared with other coastal regions.

	PO_4	NH_4
Lagune de Nador (Maroc) ¹	0,005-0,160	0,005-0,015
Lagune Oualidia (Maroc) ²	0,001-0,021	0,001-0,012
Lagune El Maleh (Tunisie) ³	0,059-1,971	0,006-0,359
Lagune de Vistonis (Grèce) ⁴	0,067-0,185	0,014-0,815
Baie d'Izmir (Turquie) ⁵	0,038-1,110	0,002-0,615
Baie de Flamengo (Brésil) ⁶	0,002-0,032	nd
Estuaire de Changjiang (Chine) ⁷	1,947	0,025-0,359
Lagune de Thau (Italie) ⁸	0,077-0,169	0,007-0,042

Tableau 2. Degré d'eutrophisation basé sur les nutriments N- NH_4 et P- PO_4 (Kitsiou & Karydis 1998)

Table 2. Eutrophication scaling based on nutrients N- NH_4 and P- PO_4 (Kitsiou & Karydis 1998)

Variable	Degrés d'eutrophisation			
	Domaine d'oligotrophie	Niveau inf. de mésotrophie	Niveau sup. de mésotrophie	Domaine d'eutrophie
Phosphates ($\mu\text{g-atP/l}$)	0	0,007	0,14	0,68
Ammonium ($\mu\text{g-atN/l}$)	0	0,55	1,05	2,2

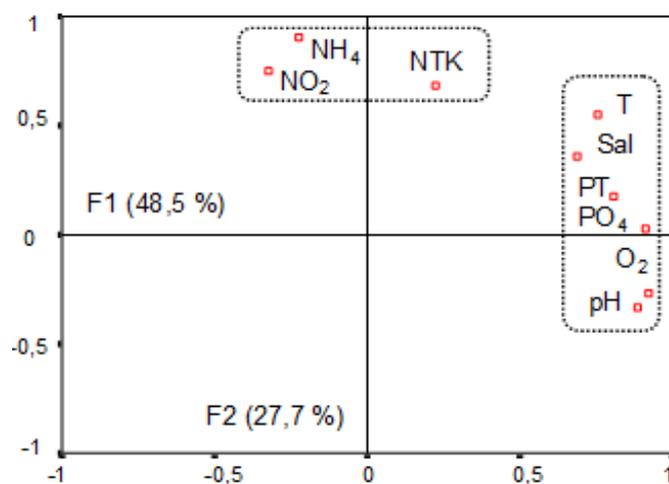


Figure 3. ACP : Contribution des variables aux facteurs F1 et F2
Figure 3. CPA : Variables contribution at the F1 and F2 factors

La distribution spatiale des facteurs F1 et F2 réalisée à l'aide du SIG (Fig.4) permet de déterminer la surface d'impact par les éléments azotés et phosphatés. C'est l'aire des valeurs positives de F1 qui représente la surface de la lagune la plus enrichie en PO_4 et PT et qui est particulièrement localisée près de Béni Ensar et de Kariat Arekman couvrant une superficie estimée à $8,5 \text{ km}^2$. L'aire des valeurs positives de F2 représente, par contre, la surface lagunaire la plus enrichie en NH_4 , NO_2 et NTK et qui est localisée surtout sur la frange étendue du point de rejet de la STEP de Nador à Tirekaa avec une superficie évaluée à $16,8 \text{ km}^2$.

Métaux lourds

Les teneurs en métaux lourds des eaux de la lagune de Nador (Tab. 3) varient de $0,1$ à $0,52 \text{ } \mu\text{g/l}$ pour le Cd, de $0,37$ à $5,48 \text{ } \mu\text{g/l}$ pour le Cr, de $5,04$ à $16,6 \text{ } \mu\text{g/l}$ pour le Cu, de $0,51$ à $21,1 \text{ } \mu\text{g/l}$ pour le Ni, de $1,16$ à $24,5 \text{ } \mu\text{g/l}$ pour le Pb et de $8,4$ à $54 \text{ } \mu\text{g/l}$ pour le Zn.

Les métaux lourds sont présents à l'état de traces dans la croûte terrestre. Leur présence dans les eaux naturelles résulte de processus naturels (érosion, altération, diffusion d'aérosols à partir des sols et de l'eau de mer) et de l'activité humaine. Cette dernière est considérée aujourd'hui comme la principale source de contamination des eaux par les métaux.

L'importance relative des sources de contamination anthropique (industrielle, domestique ou agricole) est variable selon l'élément considéré et l'occupation des sols sur le bassin versant. A cause de leur persistance, leur recyclage biogéochimique et leurs risques écologiques, les métaux lourds sont la principale préoccupation du monde entier (González-Macías *et al.* 2006). Les affluents d'eaux usées contribuent de façon majoritaire au flux de nombreux métaux. Par ailleurs, les sédiments marins sont souvent considérés comme étant le réservoir ultime des métaux lourds dans les environnements côtiers. Cependant, quand les concentrations des métaux dans les sédiments augmentent, plus de métaux lourds vont retourner à l'eau via des processus chimiques et biologiques (Valdés *et al.* 2005).

Les stocks sédimentaires côtiers représentent également un énorme dépôt potentiel de contaminants avec capacité de remobilisation et échange avec la colonne d'eau (Chiffolleau *et al.* 1994) et un transfert possible au réseau alimentaire pélagique (Mucha *et al.* 2004).

Les eaux de la lagune de Nador sont caractérisées par des teneurs en Cr, Cu, Ni, Pb et Zn supérieures à celles retrouvées dans la mer rouge (Shriadah *et al.* 2004), la baie de Samborobon (Schenone *et al.* 2007), le littoral d'Attika (Ladakis *et al.* 2007) et Santa Cruz de Tenerife (Dlaz *et al.* 1990), exception faite du Cr, du Pb et du Zn pour la baie de Samborobon (Tab.3).

L'ACP est appliquée pour indiquer le degré de contamination par les métaux lourds. Elle a été réalisée sur les teneurs des eaux en métaux lourds. L'inertie portée par les deux axes est de 73 %, soit 43% pour l'axe F1 et 30% pour l'axe F2. A l'axe F1, il y a une meilleure contribution des métaux Ni, Cu et Cr (Fig.5). Le Cu en quantité faible est essentiel aux processus biologiques et est toujours associé à une contamination par les eaux usées (Muniz *et al.* 2004). A l'axe F2, participent positivement le Cd et le Zn et négativement le Pb. Le Zn est un élément essentiel à la vie terrestre et est un composant de plusieurs systèmes enzymatiques. Il est aussi associé à la pollution par les eaux usées (Muniz *et al.* 2004). Le Cd est utilisé dans les pigments, dans les plastiques et les batteries alcalines qui contribuent à l'élévation de sa concentration dans les sédiments marins (Sin *et al.* 2001).

L'ACP appliquée sur les échantillons d'eau de la lagune permet de différencier entre quatre groupes (Fig.5). Le groupe 1, qui se place sur le pôle positif de F1, est donc plus riche en Cu, Cr et Ni. Ce groupe est représenté par les échantillons de Kariat Arekman et des zones qui lui sont proches. Le groupe 2, qui se place sur le pôle positif de F2 et qui est représenté par les échantillons situés sur la zone étalée du point de rejet de la STEP de Nador à Tirekaa (échantillons 7, 8, 9), est plus enrichi en Zn et Cd. Le groupe 3 plus enrichi en Pb, regroupe les échantillons situés dans la moitié nord de la lagune (d'Atalayoun à Béni Ensar). Le groupe 4 comprend le reste des échantillons.

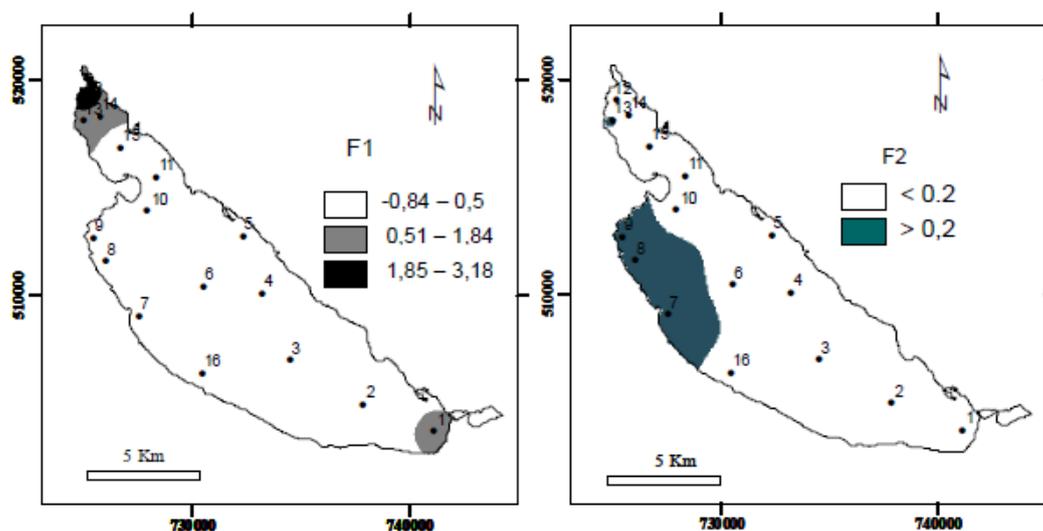


Figure 4. Distribution spatiale des facteurs F1 et F2
Figure 4. Spatial distribution of the F1 and F2 factors

Tableau 3. Teneurs en métaux lourds des eaux de certaines zones littorales en $\mu\text{g/l}$ (moyenne \pm écartype) (a : Présente étude ; b : Shriadah *et al.* 2004 ; c : Schenone *et al.* 2007 ; d : Ladakis *et al.* 2007 ; e : Dlaz *et al.* 1990)

Table 3. Mean values of dissolved trace element concentrations in some coastal sites ($\mu\text{g/l}$)

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Lagune de Nador (Maroc) ^a	0,28 \pm 0,15	1,57 \pm 1,38	8,26 \pm 2,84	3,75 \pm 5,46	7,47 \pm 5,17	19,08 \pm 12,22
La mer rouge (Egypte) ^b	0,49 \pm 0,14	nd	0,14 \pm 0,06	0,16 \pm 0,06	0,31 \pm 0,13	0,24 \pm 0,12
Baie de Samborobo'n (Punta Rasa, Argentine) ^c	9 \pm 1,8	5,3 \pm 1,1	5,12 \pm 0,69	2,59 \pm 0,4	90,48 \pm 7,57	23,46 \pm 2,5
Littoral de Attika (Grèce) ^d	0,32	nd	3,13	1,31	4,71	4,23
Santa Cruz de Tenerife (îles de Canari) ^e	0,14 \pm 0,06	nd	6,86 \pm 7,37	2,85 - 2,15	3,7 \pm 8,13	12,31 \pm 22,5

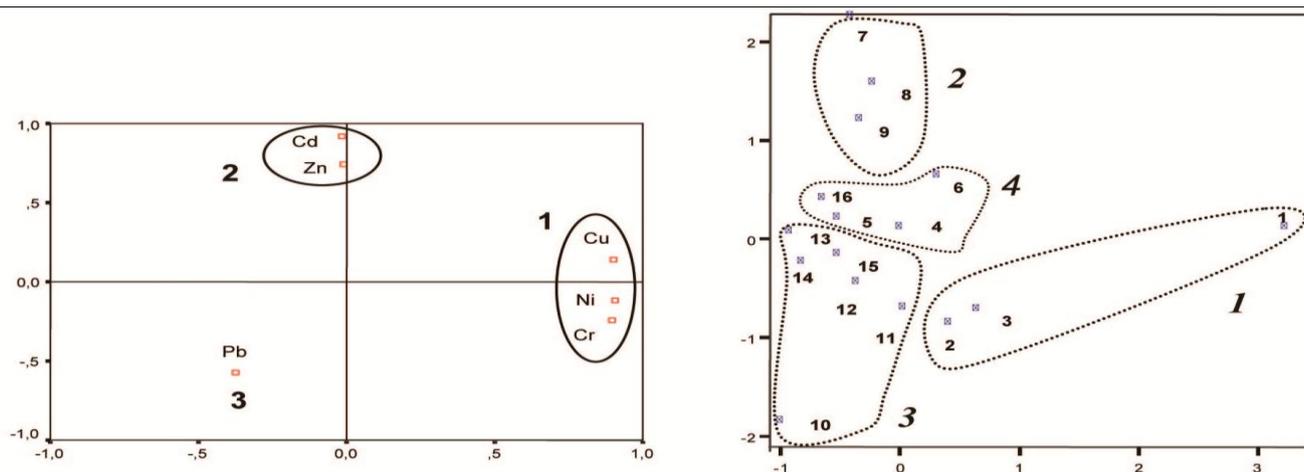


Figure 5. ACP : Projection des variables (métaux lourds) et des échantillons d'eau
Figure 5.CPA : Variables and samples projection

CONCLUSION

Si la réalisation d'une campagne annuelle de prélèvement n'est pas suffisante pour pouvoir décrire le cycle hydrologique d'une masse d'eau, elle est néanmoins suffisante pour appréhender l'impact anthropique sur le milieu. Les résultats chimiques permettent de mettre en évidence une forte concentration en azote dans la zone étalée du point de rejet de la STEP de Nador à Tirekaa, mettant en cause les rejets d'eaux usées maltraitées de la STEP de Nador, les eaux usées brutes déversées et l'impact des déchets solides. Les eaux de cette zone sont également enrichies en zinc et en cadmium. Par ailleurs, des teneurs élevées en phosphore sont concentrées dans la région de Béni Ensar qui est envahie par les macroalgues en période printanière et estivale témoignant d'un fort degré d'eutrophisation.

Dans la perspective d'une protection de la qualité des eaux de la lagune de Nador, le traitement au niveau des sources de pollution est le meilleur moyen pour améliorer la qualité des eaux et prévenir la pollution côtière. Ainsi, il devient crucial de réhabiliter les deux stations d'épuration installées sur les berges de la lagune de Nador : la STEP de Nador et celle de Béni Ensar. En outre, il serait d'une grande importance de penser à rouvrir l'ancienne passe afin d'améliorer l'hydrodynamisme et la qualité des eaux de la lagune de Nador et ceci dans sa zone Nord en particulier. Par ailleurs, il faut comprendre les relations dans le temps et

dans l'espace entre les altérations anthropiques du régime hydrologique et les nutriments pour développer des stratégies de contrôle afin de ralentir à court et long terme l'eutrophisation de la lagune de Nador.

REMERCIEMENTS

Il nous est particulièrement agréable de remercier ici l'Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya pour son aide dans les analyses physico-chimiques. Nos remerciements s'adressent également à Kaddouri et Michel (Ancienne société de pisciculture MAROST), Najib OMARI (INRH), Faïd EL MADANI (INRH) pour leur étroite collaboration dans la collecte des échantillons. J'adresse aussi mes remerciements au CNRST pour son soutien dans l'analyse des métaux lourds.

REFERENCES

- Abouhala A., Boukabous R., Dafir J.E. & Talbaoup M. (1995). Caractérisation physico-chimique de la lagune de Nador. *Actes Inst. Agron. Vét.* (Maroc), 15, 4, 43-52.
- Abreu P.C., Odebrecht C. & Gonzalez A. 1994. Particulate and dissolved phytoplankton production of the Patos Lagoon Estuary, southern Brazil: comparison of methods and influencing factors. *J. Plankton Res.*, 16, 737-753.
- Arid H., Moudni H., Orbi A., Talbaoui M., Lakhdar Idrissi J., Massik Z., Littaye A. & Paoli R. 2005. Télédétection spatiale

- et SIG pour la gestion intégrée des potentialités aquacoles. *Geo Observateur*, 14, 63-80.
- Bennouna A. 1999. *Etude du phytoplancton nuisible et de son environnement dans la lagune de Oualidia et de Sidi Moussa (Maroc)*. Thèse DES, Univ. Chouaib Doukali, El Jadida, 153p.
- Bloundi M. K. 2005. Etude géochimique de la lagune de Nador (Maroc oriental): Impacts des facteurs anthropiques. Ph.D., 480 - University of Strasbourg, France, 238p.
- Burian S.J., Streit G.E., McPherson T.N., Brown M.J. & Turin H.J. 2001. Modeling the atmospheric deposition and stormwater washoff of nitrogen compounds. *Environ. Model. Software*, 16,5, 467-479.
- Chiffolleau J.F., Cossa D., Auger D. & Truquet I. 1994. Trace metals distribution, partition and fluxes in the seine estuary (France) in low discharge regime. *Mar. Chem.*, 47, 145-148.
- CCISN, 2006. Monographie économique de Nador pour 2007. Chambre de Commerce, d'Industrie et de Service de Nador. Royaume du Maroc, 52p.
- Dakki 2004. Programme d'Aménagement Côtier en Méditerranée marocaine : Etude de faisabilité. Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement, 113p.
- Daniel A. 2004. Réseau hydrologique littoral Nomand : cycles annuels 2001-2003 et proposition d'indicateurs d'eutrophisation. IFREMER/DEL/LERN, 102 p.
- Daoudi M., Serve L., Rharbi N., El Madani F. & Vouvé F. 2012. Phytoplankton distribution in the Nador lagoon (Morocco) and possible risks for harmful algal blooms. *TWB*, 6, 1, 4-19.
- Dlaz C., Galindo L., Montelongo F.G., Larrech M. & Xavierrius F. 1990. Metals in coastal waters of Santa Cruz de Tenerife, Canary Islands. *Mar. Pollut. Bull.*, 21, 2, 91-95.
- El-Alami M., Mahjoubi R., Damnati B., Kamel S., Icole M. & Maurice T. 1998. Sédimentologie et géochimie organique des sédiments superficiels de la lagune de Nador (Maroc Nord Oriental). *J. Afr. Earth Sci.*, 26, 2, 249-259.
- Elmanama A.A., Afifi S. & Bahr S. 2006. Seasonal and spatial variation in the monitoring parameters of Gaza Beach during 2002-2003. *Environ. Res.*, 101, 25-33.
- González-Macias C., Schifter I., Lluch-Cota D.B., Mendez-Rodriguez L. & Hernandez-Vazquez S. 2006. Distribution, enrichment and accumulation of heavy metals in coastal sediments of Salina Cruz Bay, Mexico. *Environ. Monit. Assess.*, 118, 211-230.
- Guélorget O., Perthuisot J.P., Frisoni G.F. & Monti D. 1987. Le rôle du confinement dans l'organisation biogéographique de la lagune de Nador (Maroc). *Oceanol Acta*, 10, 4, 435-444.
- Guélorget O. & Perthuisot J.P. 1983. Le domaine paralique. Expressions géologiques, biologiques et économiques du confinement. *Trav. Lab. Géol. E.N.S. Paris*, 16, 1-136.
- Harvey H.W. 1955. *The Chemistry and Fertility of Sea Waters*. Cambridge University Press, London, 244p.
- Hilmi K. 2005. Modélisation numérique de la circulation de deux milieux paraliques du littoral marocain : la lagune de Oualidia (Atlantique) et la lagune de Nador (Méditerranée). Thèse de Doctorat, Fac. Sci. Ben Msik, Casablanca, 183 p.
- Inani I. 1995. Dynamique sédimentaire et pollution dans la lagune de Nador. Thèse DES, Univ. Mohammed V-Agdal, Rabat, 184 p.
- Kitsiou D. & Karydis M. 1998. Development of categorical mapping for quantitative assessment of eutrophication. *Journal of Coastal conservation*, 4, 35-42.
- Kjerfve B. 1994. *Coastal Lagoon Processes*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, The Netherlands, 577p.
- Kontas A., Kucuksezgin F., Altay O. & Uluturhan E., 2004. Monitoring of eutrophication and nutrient limitation in the Izmir Bay (Turkey) before and after Wastewater Treatment Plant. *Environ Int.*, 29, 1057-1062.
- Ladakis M., Dassenakis M., Scoullou M. & Belias C. 2007. The chemical behaviour of trace metals in a small, enclosed and shallow bay on the coast of Attika, Greece. *Desalination*, 213, 29-37.
- Lefèbvre A., Guelorget O., Perthuisot J.P. & Dafir J. 1996. Evolution biogéologique de la lagune de Nador (Maroc) au cours de la période 1982-1993. *Oceanol Acta.*, 20, 2, 371-385.
- Mahjoubi R. 2001. *Nature et origine des flux de matière particulaire et son enregistrement dans un milieu paralique microtidal : cas de la lagune de Nador (Maroc nord oriental)*. Thèse Doctorat d'Etat ès Sciences, Univ Moulay Ismail, Meknès, 273p.
- MATEE 2005. Rapport sur le diagnostic de la lagune de Nador, Version provisoire. 68p.
- Markou D. A., Sylaios G.K., Tsihrintzis V.A., Gikas G.D. & Haralambidou K. 2007. Water quality of Vistonis Lagoon, Northern Greece : seasonal variation and impact of bottom sediments. *Desalination*, 210, 83-97.
- MedWetCoast 2003. Phase diagnostic, Rapport de synthèse, site "lagune de Nador". 102 p.
- Mendiguchía C., Moreno C. & García-Vargas M. 2007. Evaluation of natural and anthropogenic influences on the Guadalquivir River (Spain) by dissolved heavy metals and nutrients. *Chemosphere*, 69, 10, 1509-1517.
- Meybeck M., Bouloubassi I., Wen H.W., Hubert P., Pasco A., Ragu A. & Toma A. 1992. *Etablissement des flux polluants*. Rapport inter-agences, Laboratoire de Géologie appliquée. Naturalia Biologia, 500 p.
- Motia S. & Al Madani F. 2006. *Pollution de la lagune de Nador : Déchets solides*. Rapport de L'Institut National de Recherche Halieutique, Centre Régional de Nador, 14p.
- Mucha A.P., Vasconcelos T.S.D. & Bordalo A.A. 2004. Vertical distribution of the macrobenthic community and its relationships to trace metals and natural sediment characteristics in the lower Douro estuary, Portugal. *Estuar. Coast. Shelf S.*, 59, 663-673.
- Muniz P., Danulat E., Yannicelli B., Garcia-Alonso J., Medina G. & Bicego M.C. 2004. Assessment of contamination by heavy metals and petroleum hydrocarbons in sediments of Montevideo Harbour (Uruguay). *Environ Int.*, 29, 1019-1028.
- Nedwell D.B., Dong L.F., Sage A. & Underwood G.J.C. 2002. Variations of the nutrients loads to the mainland UK. Estuaries : correlation with catchment areas, urbanization and coastal eutrophication. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 54, 951-970.
- Nixon S.W. 1982. Nutrients, primary production, and fisheries yields in coastal lagoons. *Oceanol. Acta.*, 5, 357-371.
- Piccini C., Conde D., Alonso C., Sommaruga R. & Pernthaler J. 2006. Blooms of Single Bacterial Species in a Coastal Lagoon of the Southwestern Atlantic Ocean. *Appl. Environ. Microbiol.*, 72, 10, 6560-6568.
- Pinckney J.L., Paerl Hans W., Tester P. & Richardson T.L. 2001. The Role of Nutrient Loading and Eutrophication in *Estuarine Ecology*. *Environ Health Persp.*, 109, 5, 699-706.
- Plus M., La Jeunesse I., Bouraoui F., Zaldívar J-M., Chapelle A. & Lazure P. 2006. Modelling water discharges and nitrogen inputs into a Mediterranean lagoon Impact on the primary production. *Ecol. Model.*, 193, 69-89.
- Povinec P.P., De Oliveira J., Braga E.S., Comanducci J-F., Gastaud J., Groening M., Levy-Palomo I., Morgenstern U. & Top Z. 2008. Isotopic, trace element and nutrient characterization of coastal waters from Ubatuba inner shelf area, south-eastern Brazil. *Estuar. Coast. Shelf S.*, 76, 522-542.
- Rigollet V., Sfriso A., Marcomini A. & De Casabianca M.L. 2004.

- Seasonal evolution of heavy metal concentrations in the surface sediments of two Mediterranean *Zostera marina* L. beds at Thau lagoon (France) and Venice lagoon (Italy). *Bioresource Technol.*, 95, 159-167.
- Ruiz F., Abad M., Garcia E.X.M., Gueddari F., Toumi A., Dassy K. & Ben Ahmed R. 2004. Los ostrácodos de la laguna de El Maleh (Túnez). *Geotemas*, 6, 303-306.
- Ruiz F., Abad M., Olías M., Galán E., González I., Aguilá E., Hamoumi N., Pulido I. & Cantano M., 2006. The present environmental scenario of the Nador Lagoon (Morocco). *Environ. Res.*, 102, 2, 215-229.
- Ryding S.O. and Rast W., 1992. Le controle de l'eutrophisation des lacs et des réservoirs. *In: Sci. de l'envir.* 9. Masson, 294 p.
- Schenone N., Volpedo A.V. & Cirelli A. F., 2007. Trace metal contents in water and sediments in Samborombón Bay wetland, Argentina. *Wetlands Ecol Manage.*, 15, 303-310.
- Shriadah M.A., Okbah M.A. & El-Deek M.S. 2004. Trace metals in the water columns of the red sea and the gulf of Aqaba, Egypt. *Water Air Soil Pollut.*, 153, 115-124.
- Simeonov V., Stanimirova I. & Tsakovski S. 2001. Multivariate statistical interpretation of coastal sediment monitoring data. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 370, 719-722.
- Sin S.N., Chua H., Lo W. & Ng L.M. 2001. Assessment of heavy metal cations in sediments of ShingMun River, Hong Kong. *Environ Int.*, 26, 297-301.
- Souchu P., Gasc A., Collos Y., Vaquer A., Tournier H., Bibent B. & Deslous-Paoli J.M. 1998. Biogeochemical aspects of bottom anoxia in a Mediterranean lagoon (Thau, France). *Mar. Ecol- Prog. Ser.*, 164, 135-146.
- Tesson M. 1977. Régime hydrologique et hydrodynamique de la Sebkha Bou Areg : Bilan du printemps. *Travaux et documents* N°21. Office National des Pêches, Institut Scientifique des Pêches Maritimes, 65p.
- Tournoud M-G., Payraudeau S., Cernesson F. & Salles C. 2006. Origins and quantification of nitrogen inputs into a coastal lagoon: Application to the Thau lagoon (France), *Ecol. Model.*, 193, 19-33.
- Valdés J., Vargas G., Sifeddine A., Ortlieb L. & Guiñez M. 2005. Distribution and enrichment evaluation of heavy metals in Mejillones Bay (23-S), Northern Chile : geochemical and statistical approach. *Mar. Pollut. Bull.*, 50, 1558-1568.
- Xiao Y., Ferreira J.G., Bricker S.B., Nunes J.P., Zhu M. & Zhang X. 2007. Tropic assessment in Chinese coastal systems - review of methods and application to the Changjiang (Yangtze) Estuary and Jiaozhou Bay. *Estuar. Coast.*, 30 ; 6, 901-918.
- Zerrouqi Z., Sbaa M., Chafi A. & Elhafid D., 2011. Investigation du lessivage des stocks de boues d'épuration de Nador : Étude sur terrain et apport de l'expérimentation. *RSE.*, 24, 4, 371-381.
- Zerrouqi Z., 2009. *Contribution à l'étude des performances des stations d'épuration des villes Nador et de Béni Ensar et du degré de pollution de leur milieu récepteur (La lagune de Nador, Maroc Oriental)*. Thèse Doc., Fac.Sci.Oujda, 160p.
- Zerrouqi Z., Sbaa M., Oujidi M., El Kharmouz M., Bengamra S. & Zerrouqi A. 2008. Assessment of cement's dust on the soil using principal component analysis and GIS. *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, 5, 1, 125-134.
- Zhou F., Guo H. & Hao Z. 2007a. Spatial distribution of heavy metals in Hong Kong's marine sediments and their human impacts : A GIS-based chemometric approach. *Mar. Pollut. Bull.*, 54, 9, 1372-1384.
- Zhou F., Guo H.C., Liu Y. & Jiang Y.M. 2007b. Chemometrics data analysis of marine water quality and source identification in Southern Hong Kong. *Mar. Pollut. Bull.*, 54, 745-756.

Manuscrit reçu le 17/8/2013

Version acceptée le 22/4/2014

Version finale reçue le 18/07/2014

Mise en ligne le 24/10/2014

