

Impact de l'aménagement hydraulique sur la qualité des eaux et des sédiments de l'estuaire du Loukkos (côte atlantique, Maroc)

Mohamed EL MORHIT^{1,4*}, Mohamed FEKHAOUI¹, Amal SERGHINI¹,
Souad EL BLIDI¹, Abdallah EL ABIDI², Rachid BENNAAKAM²,
Ahmed YAHYAOU³ & Mohamed JBILOU⁴

1. Université Mohammed V – Agdal, Institut Scientifique, Département de Zoologie et Ecologie animale, Av. Ibn Batouta, B.P. 703 Agdal, Rabat. e-mail : morhit_med@yahoo.fr

2. Institut National d'Hygiène, Laboratoire d'hydrologie, d'hygiène industrielle et environnementale, Av. Ibn Batouta, Agdal, Rabat.

3. Université Mohammed V – Agdal, Faculté des Sciences, Département de biologie, UFR Biodiversité et Aquaculture, Av. Ibn Batouta, Rabat.

4. Gendarmerie Royale, Laboratoire de Toxicologie, Rabat.

Résumé. Les variations spatio-temporelles de quelques paramètres physico-chimiques (température de l'air et de l'eau, salinité, conductivité, pH et oxygène dissous) et des teneurs de sédiments en métaux traces (Fe, Zn, Cu, Cr et Pb) ont été étudiées en 2006 au niveau de l'estuaire du bas Loukkos en relation avec les rejets des eaux usées industrielles, agricoles et domestiques de la ville de Larache et de ses environs. Les résultats montrent qu'au niveau de la station où se déversent les rejets des eaux usées de la ville de Larache, ont été notés une augmentation de la conductivité, des teneurs en oxygène dissous et une légère augmentation du pH des eaux. La salinité reste relativement élevée dans cet estuaire et ne subit de diminution importante qu'en période de lâchers de barrage en amont, provoquant un débordement des eaux sur la digue du barrage de garde. Les teneurs métalliques des sédiments restent relativement faibles sauf le chrome qui atteint des teneurs particulièrement élevées au voisinage du collecteur principal en amont de l'estuaire. Globalement, en comparaison avec d'autres estuaires marocains, la charge métallique reste dans les normes tolérables par rapport aux teneurs de référence.

Mots clés : Maroc, estuaire du Loukkos, eaux usées, métaux lourds, contamination.

Impact of the hydraulic planning on the water and sediment quality of the Loukkos estuary (Atlantic coast, Morocco).

Abstract. The spatial-temporal variations of some physical and chemical parameters (air and water temperature, pH, salinity, dissolved oxygen and conductivity) and the trace metal content in sediments (Fe, Zn, Cu, Cr and Pb) have been studied in the Loukkos estuary in 2006 in relation to wastewater discharges of industrial, agricultural and domestic origin. The results show that, at the site where flow discharges of wastewater from the city of Larache, an increase in conductivity, dissolved oxygen and a slight increase in the pH of the water were observed. Salinity remains relatively high in the estuary and does not undergo a significant decrease excepting during the periods when waters are released from dams, causing an overflow the protection dam. The metallic content remains relatively low except for chromium, which reached high levels near the main collector located upstream of the estuary. Globally, these results show that the content of these metallic elements, compared with other estuaries in Morocco, is within the acceptable standards and levels of reference.

Key words: Morocco, Loukkos estuary, wastewater, water quality, heavy metals, contamination.

INTRODUCTION

Les estuaires sont des milieux de grande importance écologique et économique. Ils sont le siège d'une activité humaine intense et/ou d'aménagements hydrauliques conduisant à des déversements de divers types de polluants qui perturbent le fonctionnement naturel de ces écosystèmes. De nombreux polluants organiques et divers oligo-éléments métalliques introduits dans ces milieux aquatiques sont susceptibles de se concentrer chez les organismes vivants à des niveaux parfois supérieurs à leurs taux dans le biotope (eau et sédiment) et peuvent donc entraîner des problèmes d'ordre écologique, sanitaire et économique (Amiard-Triquet 1989, Bryan & Langston 1992). Dans les estuaires marocains, plusieurs auteurs ont mis en évidence de telles contaminations (Cheggour 1988, Dahbi 1989, Bouachrine 1995, Serghouchni 1995, Belbachir 1997, Tahiri 2005) qui sont dues aux activités domestiques et industrielles installées le long de la côte marocaine.

Un diagnostic plus complet de la situation actuelle de la pollution et un suivi rigoureux de son évolution, s'avèrent d'une grande nécessité pour la sauvegarde de ces écosystèmes littoraux. C'est dans cette perspective que nous

avons procédé à l'étude de l'impact des eaux usées de la ville de Larache et du barrage de garde sur la qualité des eaux de l'estuaire du bas Loukkos et sur la contamination de ses sédiments.

ZONE D'ETUDE

L'estuaire du bas Loukkos est situé dans la partie nord de la côte atlantique marocaine (Fig. 1). Cette zone de contact eau douce – eau salée débouche sur une vaste plaine d'inondation divisée en deux parties distinctes par un étranglement naturel au niveau duquel a été édifié un barrage de garde qui empêche la remontée des eaux marines vers les périmètres agricoles irrigués du Loukkos. De ce fait, la zone estuarienne est tronquée artificiellement et ne concerne plus que la partie aval qui couvre près de 20 km.

Son extrémité amont est occupée par des surfaces agricoles céréalières, alors que les autres parties sont des terrains marécageux, dont presque le tiers est exploité sous forme de marais salants. Par ailleurs, le cours principal fait l'objet d'un aménagement hydraulique (barrage de garde) qui contrôle le début du cours et sert de moyen d'alimentation et de mise en eau des rizières très actives dans la zone.

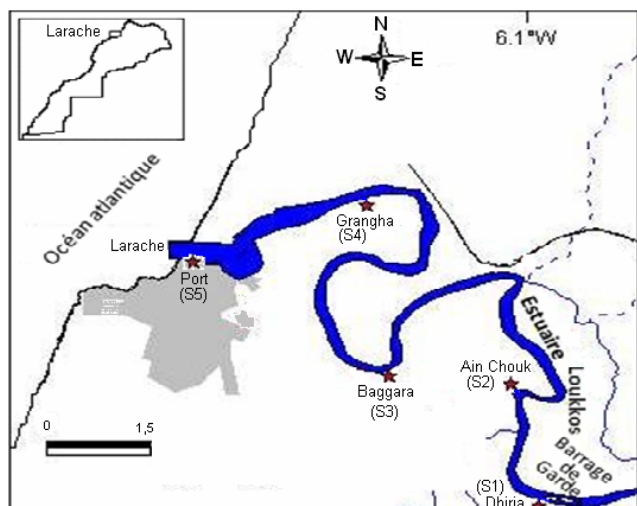


Figure 1. Localisation des stations d'étude dans l'estuaire du bas Loukkos.

MATERIEL ET METHODES

Stations d'étude

Tenant compte des diverses activités recensées dans la zone (industries agro-alimentaires, pêcheries, eaux usées domestiques), cinq stations réparties le long de l'estuaire, ont été retenues (Fig. 1) :

Dhiria (S1) : elle est située en amont de l'estuaire, au niveau du barrage de garde, à 21 km de l'embouchure. Elle est caractérisée par la présence de rizières, d'une agriculture moderne utilisant des fertilisants et d'une activité de chasse (gibier d'eau).

Ain Chouk (S2) : elle est située à proximité d'un chenal à 16 km de l'embouchure.

Baggara (S3) : située à 9 km de l'embouchure, elle est caractérisée par un surpâturage entraînant l'érosion du terrain et une grande extension de terrains agricoles.

Grangha (S4) : elle est située à 3 km de l'embouchure, juste à proximité des rejets urbains de la ville.

Port de Larache (S5) : il est situé au niveau de l'embouchure du Loukkos.

Les différents prélèvements ont été réalisés au niveau des collecteurs principaux et secondaires dans toutes les stations.

Prélèvement des eaux et mesure des paramètres physico-chimiques

Les prélèvements d'eau ont été effectués trimestriellement (mars, mai et juillet) à marée basse durant l'année 2006. Les échantillons d'eau ont été prélevés près du bord de la rivière à 20 cm de la surface à l'aide de bouteilles en plastique préalablement rincées à l'eau de la station. Ils ont été ensuite conservés à 4°C et transportés ainsi jusqu'au laboratoire. Les paramètres ayant fait l'objet de mesure *in situ* sont la température de l'air et de l'eau, le pH, la salinité, l'oxygène dissous et la conductivité.

Minéralisation et dosage des métaux traces

Soixante-quinze échantillons de sédiment ont été prélevés au cours de trois campagnes (mars, mai et juillet 2006) à marée basse au niveau de la couche superficielle à l'aide d'une benne. Ils ont été séchés à l'étuve pendant 48 heures à 80°C et tamisés dans un tamis à maille inférieure à 100 µm. Ensuite, 0,3 g de sédiments sec ont été minéralisés à 120°C pendant 4 heures en présence de 4 ml d'acide fluorhydrique et 2 ml d'un mélange acide chlorhydrique et acide nitrique conformément à la méthodologie indiquée par Tahiri *et al.* (2005).

Le dosage des métaux a été effectué sur les minéralisats après dilution selon la procédure publiée par Auger (1989), Chiffolleau & Truquet (1994), Bouachrine *et al.* (1998) et El Abidi *et al.* (2000). Le cuivre, le chrome et le plomb ont été dosés par spectrométrie d'absorption atomique (SAA) à four et par SAA à flamme dans les cas du fer et zinc.

La validité des méthodes analytiques a été vérifiée par contrôle interne à l'aide d'échantillons standard (Conseil National de Recherche du Canada : BCSS-1) et par contrôle externe à l'aide d'un exercice d'intercalibration (I.A.E.A. 1987, 1991, 1998, 1999 et 2003).

Analyse statistique

La variabilité des teneurs en métaux a été étudiée à l'aide d'une analyse de variance (ANOVA) à deux facteurs (saisons et stations) effectuée par analyse en composantes principales (ACP) du logiciel XL STAT (Foucart 1982). La comparaison multiple des moyennes de chaque élément métallique a été réalisée à l'aide du test de Friedman, chaque fois que l'analyse de variance a révélé des différences significatives.

RESULTATS ET DISCUSSION

Caractéristiques physico-chimiques des eaux

Les résultats du suivi spatial des traceurs physico-chimiques sont représentés dans la figure 2.

Température

Les températures moyennes des eaux de l'estuaire oscillent entre 21,7 °C dans la station 5 et 25,35°C dans la station 3. Ces valeurs assez élevées par rapport à celles des estuaires des régions tempérées sont comparables à celles signalées dans d'autres estuaires marocains (Cheggour 1988, Benabdallaoui *et al.* 2001, Himmi *et al.* 2003). Le faible volume des eaux présent dans l'estuaire à marée basse, la formation d'un bouchon sablo-vaseux à l'embouchure et la diminution des apports fluviaux suite à l'aménagement hydraulique du bassin versant du cours d'eau ainsi que la construction de la digue du barrage de garde ont provoqué la réduction de la hauteur des eaux et donc son réchauffement par la température de l'air qui dépend des variations saisonnières.

Globalement, la température moyenne de l'eau du site étudié suit celle de l'air qui dépend du climat régional de type méditerranéen.

Salinité

Les valeurs moyennes extrêmes de la salinité enregistrées au cours des différentes campagnes sont de 4,3 g/l dans la station 1 (amont) et de 34,65 g/l au niveau du port.

A marée basse s'observe un gradient décroissant très accentué aval-amont qui s'explique par l'arrivée des masses d'eau douce amont, qui abaissent la salinité de la station 1 (lâcher épisodique du barrage de garde et maintien d'un débit écologique).

Par ailleurs, durant la saison pluvieuse, les apports pluviométriques abaissent la salinité des eaux, contrairement à la saison sèche où a lieu une élévation de ce paramètre aidé par la forte évaporation. Ce phénomène a été observé au cours de l'année 2006.

Conductivité

La mesure de ce paramètre constitue une bonne appréciation du degré de minéralisation d'une eau où chaque ion agit par sa concentration et sa conductivité spécifique.

Les valeurs moyennes enregistrées montrent des variations importantes. Elles oscillent entre 758 $\mu\text{s}/\text{cm}$ à Dhiria et 42900 $\mu\text{s}/\text{cm}$ au port, dénotant un gradient décroissant aval-amont. Ceci s'explique à la fois par l'éloignement des influences marines et la dilution par les apports en eaux douces.

pH

Le pH de l'eau est alcalin pour toutes les stations. Il varie entre 7,43 à Baggara (S3) et 7,70 au port (S5). Les valeurs de ce paramètre restent relativement élevées le long de l'estuaire sauf au niveau de Baggara où a lieu une légère diminution liée aux apports des rejets de ruissellement.

L'estuaire de Loukkos montre un pH très variable en rapport avec les fluctuations probables de la salinité qui suivent le cycle marégraphique et probablement les fluctuations de la charge organique.

Les valeurs moyennes enregistrées du pH sont alcalines à cause de l'effet tampon des eaux océaniques. D'autres auteurs ont montré que les eaux des estuaires (Sebou et Oum Rbia) sont très tamponnées. Le pH est de l'ordre de 8, en raison du système tampon développé par les carbonates et les bicarbonates (Ezzaouaq 1991, El Bliidi *et al.* 2003, Himmi *et al.* 2003).

Oxygène dissous

L'oxygène dissous des eaux superficielles varie entre 5,21 mg/l à Dhiria et 8,06 mg/l au port. Ces concentrations moyennes relativement élevées ne reflètent pas le taux de la charge organique existante réellement dans la phase dissoute de l'eau. Ceci pourrait être expliqué par les mouvements de la marée, qui engendrent un brassage continu de la masse d'eau et par conséquent un enrichissement de la phase dissoute. Les valeurs de l'oxygène dissous les plus élevées ont été enregistrées au niveau de l'embouchure, soumise aux influences directes des eaux marines oxygénées. Les eaux des stations 1 et 2 présentent des teneurs relativement élevées. Ces teneurs pourraient s'expliquer, d'une part, par l'absence d'apports organiques amont et d'autre part, par l'absence de remontée de la charge vers les stations les plus en amont en raison de la décantation de la charge le long du trajet et son piégeage au niveau du lit du cours d'eau (Fekhaoui *et al.* 1993, El Bliidi *et al.* 2003).

Contamination métallique des sédiments

Les résultats des analyses des éléments métalliques réalisés dans les sédiments sont présentés dans le tableau I et la figure 3.

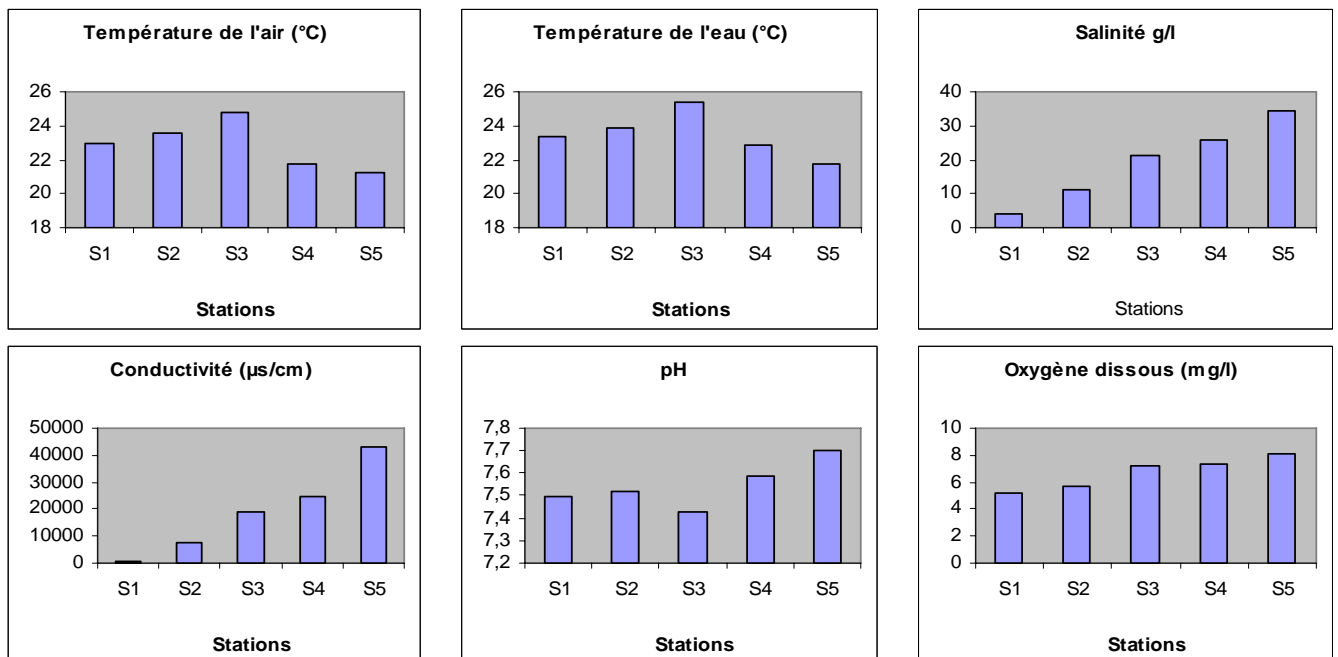


Figure 2. Variations spatiales des valeurs moyennes des paramètres physicochimiques au niveau de l'estuaire de l'Oued Loukkos (n=3).

Tableau I. Teneurs métalliques des sédiments dans les différentes stations de l'estuaire du bas Loukkos durant l'année 2006 en ($\mu\text{g/g}$ du poids sec) à l'exception de Fe, qui sont en mg/g .

	Stations	Fe	Zn	Cu	Cr	Pb
11/03/06	S1	23,46	105,2	26,1	88,75	99,4
	S2	21,64	140,4	15,6	67	80,1
	S3	36,69	110,6	28,5	2,1	119,8
	S4	15,66	108,7	25,4	100,6	110,5
	S5	40,57	102,7	26,6	3,6	123,9
06/05/06	S1	39,82	159,9	20,89	93,6	89,9
	S2	36,06	154,6	23,5	78,4	93,4
	S3	17,96	98,69	12,98	92,9	75,4
	S4	37,91	102,8	18,9	111,7	101,5
	S5	33	106,8	13,8	113,1	112,4
26/07/06	S1	37,96	111	29,8	99,87	103,5
	S2	40,28	119	24,67	49,1	95,96
	S3	22,15	113,6	26,1	9,7	89,01
	S4	35,31	93,7	22,3	102,3	122,1
	S5	27,37	112,1	27,6	112,8	124,3
Moyenne \pm Ecart-type		31,06 \pm 9,45	115,97 \pm 13,42	22,84 \pm 4,81	75,03 \pm 31,73	102,90 \pm 17,71

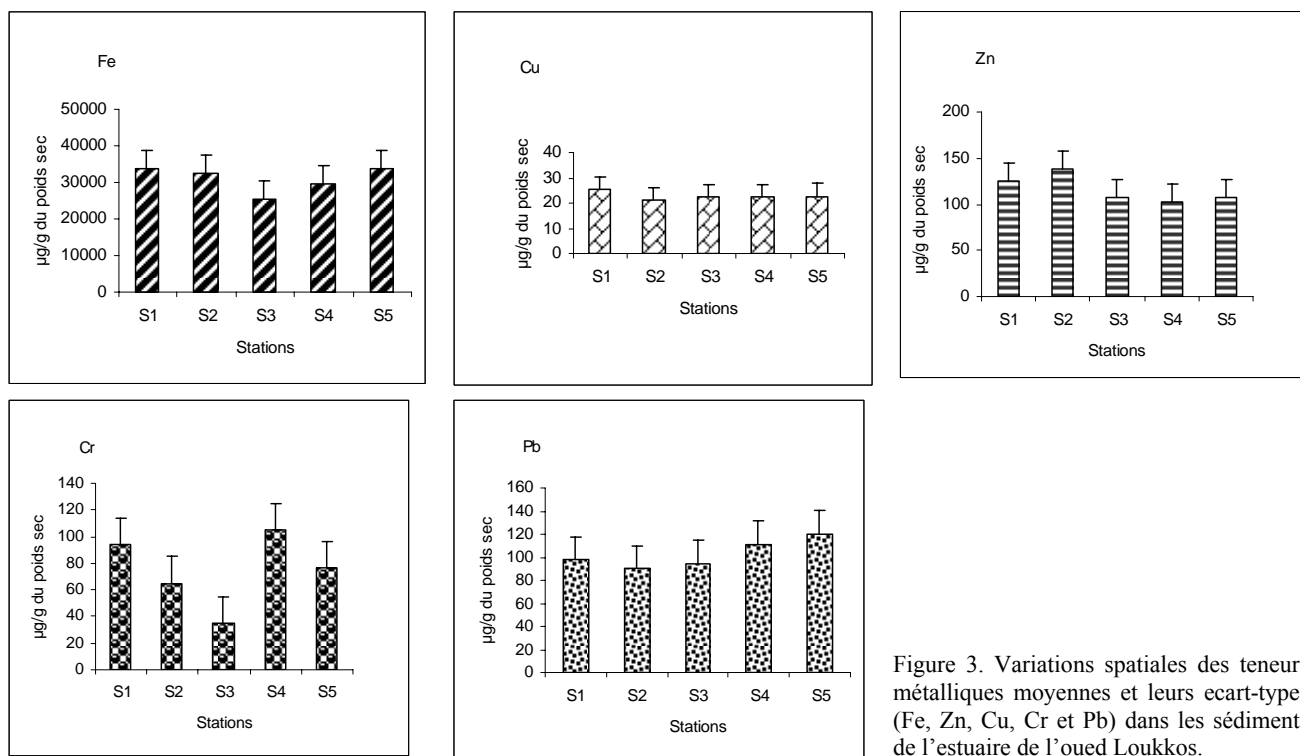


Figure 3. Variations spatiales des teneurs métalliques moyennes et leurs écart-types (Fe, Zn, Cu, Cr et Pb) dans les sédiments de l'estuaire de l'oued Loukkos.

Les concentrations moyennes les plus élevées sont celles du fer (31,06 mg/g) suivi du zinc (115,97 $\mu\text{g/g}$), du plomb (102,90 $\mu\text{g/g}$), du chrome (75,03 $\mu\text{g/g}$) et du cuivre (22,84 $\mu\text{g/g}$). Les stations S1 et S5 montrent les taux les plus élevés en éléments métalliques, notamment dans le cas du chrome, du cuivre, du fer et du zinc en comparaison avec la station S3, localisée plus loin des rejets. Cet enrichissement en éléments métalliques est à mettre en relation avec les apports d'eaux usées de la ville de Larache qui se déversent dans la station S4. En effet, Cu, Pb, Zn et

Fe sont des éléments métalliques caractéristiques d'une pollution de type urbain (Lauenstein & Dolvin 1992, Bennasser *et al.* 2000).

Les résultats des analyses des métaux lourds dans les sédiments montrent que pour Cu (22,84 $\mu\text{g/g}$), les teneurs sont inférieures aux teneurs de référence (R.N.O., 1995) qui sont de 30 $\mu\text{g/g}$; par contre, pour Zn (115,97 $\mu\text{g/g}$), les teneurs sont supérieures aux teneurs de référence (90 $\mu\text{g/g}$) (U.S.E.P.A. 1986), soulignant ainsi une pollution modérée par Zn.

Tableau II. Comparaison des teneurs métalliques de l'estuaire du bas Loukkos avec d'autres estuaires marocains et mondiaux en ($\mu\text{g/g}$) à l'exception de Fe, qui sont en mg/g .

Nom de l'estuaire	Cu	Zn	Fe	Cr	Pb	Référence
Basse Moulouya	5,5-17,5	63-244	1,16-1,24	-	0-39	Rahhou (1995)
Bouregreg	4-30	100-430	10-50	10-100	12,5-108	Cheggour (1990)
Oum R'bia	-	34,5-43,7	3,12-3,58	-	22-35,7	Kaimoussi (1996)
	8,8-14,75	39,8-66,7	6,41-6,68	17-22	2,7-13,2	Benabdallaoui (2001)
Sebou	14-40	50-90	0,01-2,15	0,4-1,7	0,5-19	Fekhaoui (1990)
	25	49	2,13	3,8	12	Mergaoui (2003)
	51,5	179	29,2	-	-	Cheggour <i>et al.</i> , (2005)
Loukkos	32,4	131	20,80	-	-	Cheggour <i>et al.</i> , (2005)
	22,84	115,97	31,06	75,03	102,90	Présente étude

Dans toutes les stations, la teneur moyenne en Fe (31,06 mg/g) dépasse celle du sédiment non pollué (13,20 mg/g) (Nicolado & Nott 1998). L'excès de Fer pourrait provenir du lessivage du sol agricole et du contexte géologique régional (richesse en ferro-magnésiens dans les sédiments) comme à Sidi Moussa et à Oualidia (Kaimoussi 1999).

Une contamination significative a été notée pour le chrome puisque les teneurs moyennes (75,03 $\mu\text{g/g}$) relevées dépassent les teneurs moyennes de référence, qui sont de 3,8 $\mu\text{g/g}$ dans l'oued Sebou (Mergaoui 2003). Par ailleurs, l'évolution spatiale de cette contamination fait apparaître une diminution de la teneur en chrome au niveau de la station S3 située au milieu de l'estuaire. Cette réduction peut être liée à la dynamique marégraphique de l'estuaire. En effet, la remontée des eaux marines très minéralisées entraîne une remobilisation et un relargage des métaux particulièrement, le chrome à partir des sédiments. Le déplacement de cette charge entraîne une augmentation de la teneur au niveau de la station S4, la plus proche.

La comparaison du niveau de contamination de l'estuaire du bas Loukkos avec les autres estuaires marocains (Tab. II) montre une forte contamination de ce site par l'ensemble des éléments, dépassant de loin les valeurs relevées dans les sédiments de l'Oued Oum R'bia (Fe : 3,12-6,68 mg/g ; Zn : 34,5-66,7 $\mu\text{g/g}$ et Pb : 2,7-35,7 $\mu\text{g/g}$) dans les sites considérés comme les plus pollués (Kaimoussi 1996). Cette pollution serait liée, du moins en partie, à une activité agricole basée sur l'usage massif de fertilisants et de pesticides, sachant que les fongicides sont riches en zinc et en fer et que les composés phosphatés contiennent d'importantes quantités de cadmium (le plomb est souvent associé au cadmium). De plus, le charriage et le lessivage des terrains agricoles en période pluvieuse favorisent l'accumulation des métaux dans les compartiments physiques.

Les concentrations élevées de Pb au niveau des stations 4 et 5 semblent être liées en partie au grand trafic routier (route principale et autoroute) qui relie Larache à Tanger. Le plomb, utilisé comme antidétonant dans les carburants des moteurs des véhicules, est libéré directement dans l'atmosphère par les pots d'échappement. La contamination est directe par les retombées atmosphériques ou indirecte après lessivage des routes par les eaux pluviales (Conor 1980, Goody *et al.* 1995).

Indice de contamination

Pour la standardisation de cette contamination, nous avons adopté l'indice de contamination (IC) qui tient compte des teneurs de référence. Ces dernières sont difficiles à établir en raison de leur grande hétérogénéité liée principalement aux paramètres physico-chimiques, géochimiques et lithologiques (Belamie & Phelippot 1982). Dans la présente étude, c'est la station S3 qui a été retenue comme site de référence compte tenu de sa localisation loin de toute perturbation d'origine anthropique et de ses faibles teneurs en métaux comparées à celles mesurées au niveau des autres stations.

Evaluation du degré de contamination

L'évaluation du degré de contamination à partir de l'ensemble des résultats relevés dans les sédiments étudiés comporte un problème quant au choix de la méthode, plusieurs méthodes ayant été proposées (Pinat & Piccot 1991, Rosso *et al.* 1993, Bennasser *et al.* 1996). En l'absence d'une estimation de la teneur en matière organique dans les sédiments, seul l'indice de contamination (IC) a été retenu. Il est défini comme étant le rapport du métal au niveau du site donné sur la teneur du métal au niveau du site de référence (S3).

Les résultats révèlent une contamination polymétallique accentuée pour le chrome dans les stations S4, S1 et S5 situées en aval des points de rejet (Fig. 4).

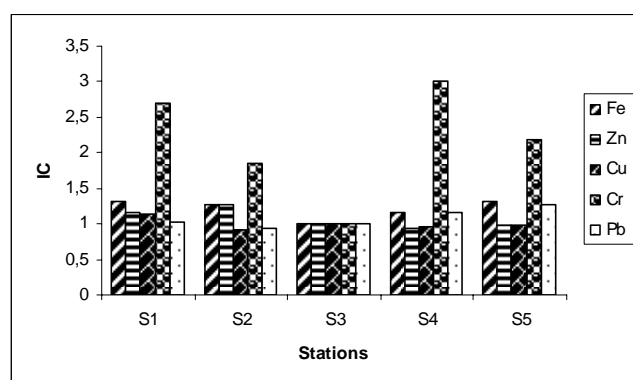


Figure 4. Variations spatiales des indices de contamination (IC) dans les sédiments de l'estuaire du Loukkos.

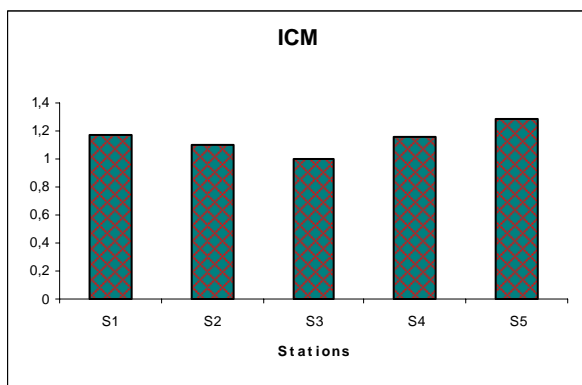


Figure 5. Variations spatiales des indices de contamination polymétallique moyennes dans les différentes stations d'étude.

Dans la figure 5, la comparaison des indices de contamination polymétallique (I.C.P) montre que la station 5 (Port) présente l'indice le plus élevé (1,28) traduisant ainsi une forte contamination métallique de cette station de l'estuaire du bas Loukkos.

Analyse de variance (ANOVA) des éléments en trace métalliques dans les sédiments

L'analyse de variance à deux facteurs (test de Friedman), effectuée sur la teneur en fer, zinc, cuivre, chrome et plomb ne révèle pas de différences significatives ($P > 0,05$) entre les stations (Tab. III). La comparaison des variances par le même test révèle des différences significatives pour la teneur en chrome et plomb entre les saisons ($P \leq 0,05$).

Tableau III. Analyse de variance à deux variables pour chaque métal au niveau des sédiments (test de Friedman significatif si $P \leq 0,05$).

	Fe	Zn	Cu	Cr	Pb
Saisons	0,8187	0,8187	0,0742	0,0407	0,0407
Stations	0,6150	0,2805	0,6150	0,0915	0,0822

Typologie de la contamination métallique du bas Loukkos

L'analyse multifactorielle (ACP) effectuée nous a permis de classer et de traiter les informations relatives aux paramètres physico-chimiques de l'eau et des éléments traces métalliques dans les sédiments au cours de la période d'étude par l'établissement des corrélations entre l'ensemble des variables de l'estuaire du bas Loukkos.

Cette ACP a été effectuée sur une matrice des données constituée de 15 prélèvements (5 stations x 3 campagnes) au cours desquels les 11 variables (température de l'air et de l'eau, salinité, conductivité, pH, oxygène dissous, Fe, Zn, Cu, Cr et Pb) ont été mesurées.

Les valeurs propres des deux composantes F1 et F2 et leur contribution à l'inertie totale sont représentées dans la Figure 6A.

Les codes des variables ayant une forte corrélation et leurs coordonnées sont représentés dans le tableau IV.

Les résultats (Tab. IV et Fig. 6A) permettent d'effectuer une première approche typologique des différentes variables selon leurs affinités et leurs regroupements sur les deux premières composantes principales à partir de leur contribution. Les deux premiers axes déterminent 48,40 % de l'information totale (27,88 % pour l'axe 1 et 20,52 % pour l'axe 2).

Les valeurs propres de l'ACP, les cartes factorielles et le cercle de la corrélation sont représentés dans la figure 6.

Dans le plan factoriel F1 x F2

L'axe 1 est déterminé par la conductivité ($r=0,91$), la salinité ($r=0,89$) et le Pb ($r=0,84$) opposé au Zn ($r=-0,62$). Il définit un gradient de minéralisation.

L'axe 2 est par contre représenté par la température de l'air et de l'eau (respectivement $r=0,80$ et $r=0,86$) (Figure 6B). Il définit un gradient thermique qui se traduit par des eaux froides pendant le mois de mars et chaude pendant le mois de juillet. Cependant, l'influence de la saisonnalité, particulièrement la température, semble moins perceptible. Aucune relation ne se dégage entre ce paramètre et la teneur des sédiments en Pb et en Zn. En effet, l'augmentation de la salinité (conductivité) permet de maintenir le Pb à des valeurs élevées dans les sédiments contrairement à ses valeurs en eau douce où il est beaucoup plus soluble. Cet état favorise son relargage dans l'eau.

Pour Zn, et contrairement à Pb, sa présence dans les sédiments est favorisée par une faible minéralisation (salinité) des eaux. L'augmentation de la salinité favorise son relargage dans les sédiments.

L'analyse globale permet de définir une typologie dominée par l'individualisation de 3 groupes de stations GI, GII, GIII (Figure 6C). Cette organisation spatiale dégage la position exacte des stations par rapport à leur situation :

Le groupe I (GI) comprend les stations amont S1 (RD, MD, JD) et S2 (RA, MA, JA) situées dans une zone à faible minéralisation mais qui se caractérise par une forte activité agricole (riziculture) à l'origine de la présence du zinc dans cette zone. Ce groupe est opposé au groupe III (GIII) représenté par les stations S4 (RG, MG, JG) et S5 (RE, ME, JE) les plus en aval. Il est caractérisé par une minéralisation importante liée aux influences marines et une charge importante en Pb. La présence de cet élément pourrait être liée au trafic routier (autoroute, routes principales, etc.). Le plomb est utilisé comme anti-détonateur dans l'essence. En effet, les travaux de Miquel (2003) ont montré qu'une autoroute de taille moyenne (25 000 véhicules/jour) produit une tonne de matières en suspension par km et par an (1 km d'autoroute = 2 hectares), dont 25 kg d'hydrocarbures, 4 kg de zinc, 0,5 kg de plomb.

Entre les deux se situe le groupe II (GII) représenté par la station 3 à toutes les saisons (RB, MB, JB), dénotant une qualité des eaux et une contamination moyenne en zinc et plomb.

Tableau IV. Codes de l'ACP et corrélations des variables avec les axes.

Stations	Code	Campagnes	Code	Variables	Codes	Axe 1	Axe 2
Dhiria	D	Mars	R	T° air	Ta	-0,311	0,803
Ain Chouk	A	Mai	M	T° eau	Te	-0,358	0,864
Baggara	B	Juillet	J	Conductivité	Cn	0,915	0,112
Grangha	G			Salinité	Sa	0,895	0,118
Embouchure	E			Pb	Pb	0,848	0,208
				Zn	Zn	-0,617	-0,332

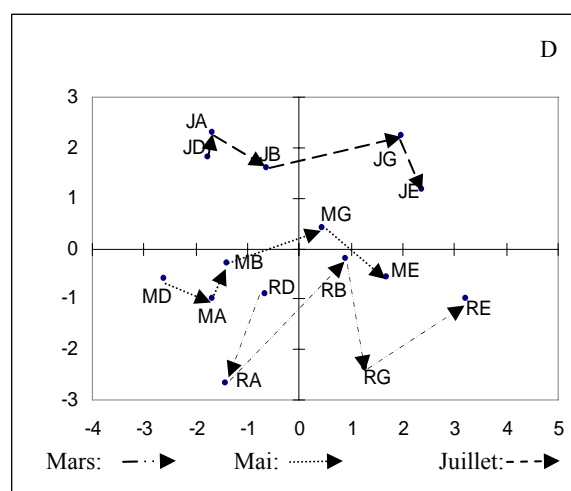
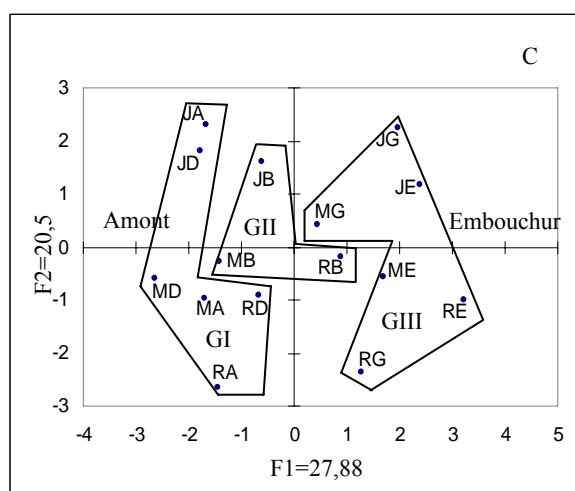
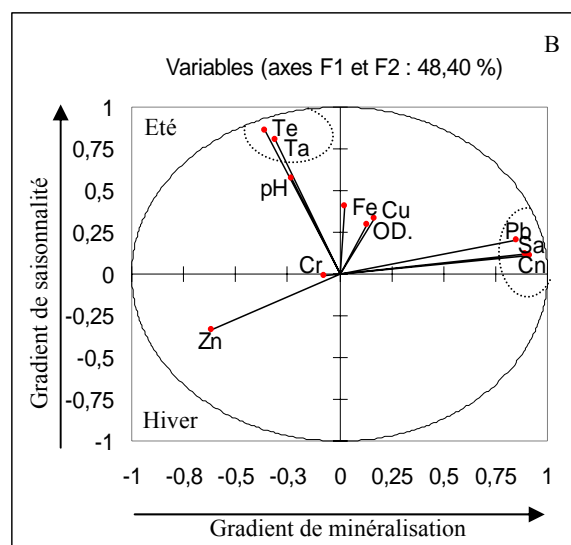
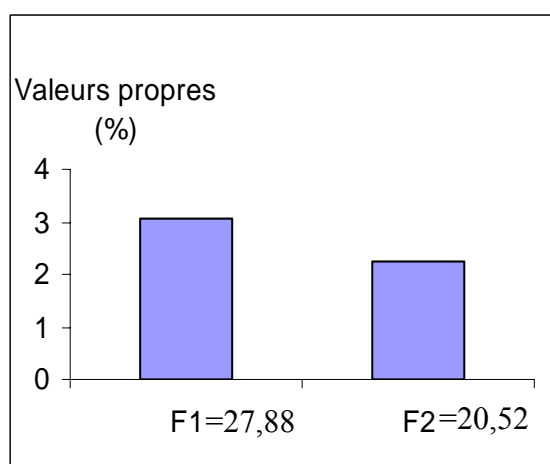


Figure 6. Approche graphique de l'ACP des paramètres physico-chimiques dans l'eau et des métaux dans les sédiments selon le plan F1xF2. A, répartition de l'inertie entre les axes ; B, cercles de corrélation des variables ; C et D, carte factorielle des stations et des campagnes.

Les variations saisonnières ne semblent pas modifier le niveau de contamination par Pb et Zn à l'exception du mois de mai où on note une légère diminution de la teneur de Pb au niveau de la station 5 (ME) et le mois de mars où le niveau de contamination de la station 1 (RD) est faible par rapport aux autres campagnes (Figure 6D).

Le comportement différent de Pb et de Zn pourrait être expliqué par l'influence des variations des conditions physicochimiques du milieu notamment la salinité.

Différentes études ont établi un lien entre la présence de sels dans les eaux et l'accroissement de la mobilité des métaux. Norrstrom & Jacks (1998) montrent qu'une large part du Zn présent dans un sédiment est susceptible d'être

solubilisé quand il est exposé à une forte salinité. Ceci corrobore avec nos propres résultats.

CONCLUSION

A la lumière des résultats obtenus au niveau des paramètres physico-chimiques mesurés dans l'eau et de la charge métallique des sédiments, on constate l'existence d'une dégradation de la qualité des eaux et d'une contamination métallique de l'estuaire du bas Loukkos, particulièrement en amont et en aval de celui-ci. En effet, le pH de l'eau est acceptable pour la survie d'organismes vivants, la salinité et la conductivité quant à elles restent très élevées selon la position des stations par rapport aux diverses influences. La comparaison de la contamination métallique de l'estuaire de Loukkos avec d'autres estuaires marocains et mondiaux montre que celle-ci reste dans les limites tolérables en relation avec le faible degré de développement socio-économique de la ville de Larache pouvant générer des pollutions plus importantes.

L'analyse typologique pratiquée confirme ceci et permet de mettre en relation le degré de minéralisation des eaux et la présence des éléments métalliques dans les sédiments. En effet, l'augmentation de la salinité (conductivité) permet de

maintenir le plomb à des valeurs élevées dans les sédiments. Alors qu'en eau douce le plomb est beaucoup plus soluble dans l'eau. Cet état favorise son relargage dans l'eau.

Néanmoins, la mise en place du barrage de garde a diminué les capacités de l'estuaire à évacuer les polluants car la dynamique fluviale est devenue très faible par rapport à celle de la mer. Ces changements hydrodynamiques pourraient être à l'origine de son confinement par l'ensablement massif de son embouchure. Ceci risque d'entraîner une augmentation de la contamination de ce milieu par les métaux traces et d'autres types de polluants et par conséquent les risques écotoxicologiques liées aux caractères bioaccumulation de ces éléments. Un suivi minutieux de l'évolution de cette pollution s'avère d'une grande nécessité pour sauver et protéger cet écosystème, afin de préserver ses potentialités bioécologiques et d'améliorer l'état de santé de la population riveraine.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une collaboration entre l'Institut Scientifique et l'Institut National d'Hygiène (Rabat). Les auteurs remercient les évaluateurs anonymes pour les remarques et commentaires qui ont permis d'améliorer le manuscrit.

Références

- Amiard-Triquet C. 1989. Bioaccumulation et nocivité relatives de quelques polluants métalliques à l'égard des espèces marines. *Bull. Ecol.*, 20, 2, 129-151.
- Auger D. 1989. Méthode de dosage de cadmium, du cuivre, du plomb et du zinc dans les milieux biologiques. Rapp. Direction environnement recherches océaniques (DERO) 07-MB.
- Belamie R. & Phelippot S. 1982. Etude du niveau de contamination des sédiments de plusieurs cours d'eau du bassin Parisien (France) par les métaux et les composés Organochlorés. Rapport Nr 16, société Hydrotechnique de France, XVII^{ème} journée de l'hydraulique, Nantes, 14-16 septembre, 7 p.
- Belbachir C. 1997. *Contribution à l'étude de la pollution bactérienne et métallique du littoral méditerranéen du Maroc oriental. Cas de l'embouchure de la Moulouya*. Thèse 3^o cycle, Univ. Mohammed I^{er}, Fac. Sci. Oujda, 145 p.
- Benabdallaoui Y., Chlaida M. & Zabari M. 2001. Impact de l'aménagement hydraulique sur la qualité des eaux et des sédiments de l'estuaire de l'Oum Rbia (côte atlantique, Maroc). *Bull. Inst. Sci.*, Rabat, section Sciences de la Vie, 23, 71-76.
- Bennasser L., Fekhaoui M. & Bouachrine M. 1996. Utilisation d'un nouvel indice dans l'évaluation de contamination métalliques des sédiments d'un cours d'eau pollué : le bas Sebou (Maroc). *Bull. Inst. Sci.*, Rabat, 20, 142-145.
- Bennasser L.M., Fekhaoui M. & Mameli O. 2000. Assessment of the metallic contamination of the low Sebou sediments. *Ann. Chimica*, 90, 637-644.
- Bouachrine M., Fekhaoui M., Bennasser L. & Mokhtar N. 1995. Evaluation du degré de la contamination de la faune ichthyologique du bas Sebou. *Premier Congrès nat. limnologie*, 21-22 Déc. 1995, Fès.
- Bouachrine M., Fekhaoui M., Bennasser L. & Idrissi L. 1998. Distribution of selected metals in tissue samples of fish from industrially contaminated stream (the river Sebou, Morocco). *Acta hydrobiol.* 40, 173-179.
- Bryan G.W. & Langston W.J. 1992. Bioavailability, accumulation and effects heavy metals in sediments with special reference to united estuary. *Environ. Pollution*, 76, 89-131.
- Cheggour M. 1988. *Contribution à l'étude d'un milieu paralique : l'estuaire de Bouregreg (côte atlantique marocaine) ; conditions écologiques globales et étude de la contamination métallique*. Thèse de 3^{ème} cycle, E.N.S. Takadoum, Rabat, 337 p.
- Cheggour M., Texier H., Moguedet G. & Elkaïm B. 1990. Metal exchange in the fauna-sediment system. The case of *Nereis diversicolor* and *Scrobicularia plana* in the Bou Regreg estuary (Morocco). *Hydrobiologia*, 207, 209-219.
- Cheggour M., Chafik A., Fisher N.S. & Benbrahim S. 2005. Metal concentrations in sediments and clams in four Moroccan estuaries. *Mar. Environ. Res.*, 59, 119-137.
- Chiffolleau J.F. & Truquet I. 1994. Nouvelles méthodes de dosage de quelques métaux traces dans les sédiments et les matières en suspension. Rapp. Ifremer, 08.
- Conor R. 1980. *Metals contamination of food*. Applied sciences publishers (Ed), London, 290 p.
- Dahbi N. 1989. *Contribution à l'étude d'un milieu paralique : l'estuaire de Bouregreg (côte atlantique marocaine) ; hydrologie, hydrodynamique et pollution métallique*. Thèse 3^{ème} cycle, E.N.S. Takadoum, Rabat, 150 p.
- El Abidi A., Idrissi L., Taleb H., Azizi A., Mameli O. & Melis P. 2000. The impact of lead pollution on the environment of Rabat-Salé (Morocco). *Ann. Chimica*, 90, 695-702.
- El Blidi S. & Fekhaoui M. 2003. Hydrologie et dynamique marégraphique de l'estuaire du Sebou (Gharb, Maroc), *Bull. Inst. Sci.* Rabat, section Sciences de la Vie, 25, 57-65.
- Ezzaouaq M. 1991. *Caractérisation hydrodynamique, physico-chimique et bactériologique des eaux superficielles de l'estuaire du Bouregreg (Maroc) soumis aux rejets des villes de Rabat-Salé*. Thèse D.E.S. Univ. Mohammed V, Fac. Sci. Rabat, 140 p.
- Fekhaoui M. 1990. *Recherches hydro biologiques sur le moyen Sebou soumis aux rejets de la ville de Fès: suivi d'une*

- macropollution et évaluation de ces incidences sur les composantes physiques, chimiques et biologiques de l'écosystème.* Thèse Doctorat d'Etat, Univ. Mohammed V, Fac. Sci. Rabat, 165 p.
- Fekhaoui M., Bennasser L., Segle-Murandi F. & Benoit-Guyod J.L. 1993. Water pollution in the Sebou river basin (Morocco) – preliminary result. First Setac World Congress: Ecotoxicology and environmental chemistry – a global perspective. Lisbon, Portugal, March, 2831.
- Foucart S. 1982. Analyse factorielle. Programme sur ordinateur. Masson, Paris, France.
- Goody D.C., Shand P., Kinniburgh D.G. & Vanriemendij K. 1995. Field-based partition coefficients for trace elements in soil solutions. *Europ. J. Soil Sci.*, 46, 265-285.
- Himmi N., Fekhaoui M., Foutlane A., Bouchich H., El Maroufy M., Benazzou T. & Hasnaoui M. 2003. Relation plancton-descripteurs physique et chimique dans un bassin de maturation (Lagunage Mixte Ben Slimane - Maroc). *Riv. Idrobiol.*, Perugia, 42, 1-3, 107-129.
- I.A.E.A. 1991. *Marine environment laboratory. MESL Report. IAEA /080/IAEA / MEL/56*, Worldwide Regional intercomparison for determination of trace elements in polluted marine sediment. IAEA-356, Monaco.
- Kaimoussi A. 1996. *Étude de la variabilité de l'accumulation des métaux lourds dans les différents compartiments (sédiment, mollusques et algues) du littoral de la région d'El Jadida.* Thèse de 3^{ème} cycle, Univ. Chouaib Doukkali, Fac. Sci. El Jadida, 147 p.
- Kaimoussi A. 2002. *Etude de la pollution au niveau du littoral de la région d'El Jadida.* Thèse de Doctorat d'Etat Es Sciences physiques. Univ Chouaib Doukkali, Fac. Sci. El Jadida, 170 p.
- Lauenstein G.G. & Dolvin S.S. 1992. Mollusk monitoring of united state coastal and estuary environments. *Analisis*, 20, 06, pagesM23-M26.
- Mergaoui L. 2003. *Diagnostic d'un état de pollution organique et métallique de deux zones humides : cas de Merja Zerga et de bas Sebou.* Thèse de Doctorat en biologie, Univ. Sidi Mohammed ben Abdellah, Fac. Sci. Fès, 74 p.
- Metayer C., Amiard J.C., Amiard-Triquet C. & Berthet B. 1985. Facteurs biologiques et écologiques contrôlant le niveau d'éléments traces (Cd, Pb, Cu et Zn) chez les moules et les huîtres de la baie de Bouregneuf. *Bull. Soc. Sc. Nat. Ouest de la France*, n. s., 7, 2, 53-69.
- Miquel M.G. 2003. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. «La qualité de l'eau et de l'assainissement en France». Tome II – annexes. N° 215 Sénat session ordinaire, 23-24.
- Nicolado A. & Nott J.A. 1998. Metal in sediment, Seagrass and Gasteropods near a Nickel smelter in Greece: possible interactions. *Mar. Pollut. Bull.*, 36, 5, 360-365.
- Norrstrom A.C. & Jacks G. 1998. Concentration and fractionation of heavy metal in roadside soils receiving de-icing salts. *The science of the total environment*, 218, 161-174.
- Pinat G. & Picot B. 1991. Métaux traces dans les sédiments d'une lagune méditerranéenne : l'étang de Thau (France). *Oceanol. Acta*, 14, 459-472.
- Rahhou I. 1995. *Contribution à l'étude écologique et toxicologique des civelles d'Anguilla anguilla de la basse Moulouya.* Thèse 3^{ème} cycle, Univ. Mohammed Premier, Fac. Sci., Oujda, 68 p.
- R.N.O. 1995. Programmes actuels, les contaminants dans la matière vivante, les métaux lourds dans les sédiments de la baie de Seine (campagne 1993). Travaux du RNO. Edition 1995. Ifremer et ministre de l'aménagement du territoire et de l'environnement, 36 p.
- Rosso A., Lafont M. & Exinger A. 1993. Effets des métaux lourds sur les peuplements d'oligochètes de l'Ille et de ses affluents (haut Rhin, France). *Ann. Limnol.*, 29, 3-4, 295-305.
- Tahiri L., Bennasser L., Idrissi L., Fekhaoui M., El Abidi A. & Mouradi A. 2005. Contamination métallique de *Mytilus galloprovincialis* et des sédiments au niveau de l'estuaire de Bouregreg (Maroc). *Water qual. Res. J.*, 40, 1, 111-119.
- Serghouchni M. 1995. *Contribution à l'étude écologique et toxicologique des civelles d'Anguilla anguilla de la basse Moulouya.* Thèse 3^{ème} cycle, Univ. Mohammed 1^{er}, Fac. Sci. Oujda, 159 p.
- U.S.E.P.A. 1986. Recommended protocols for measuring trace metals in Puget sound sediments and tissue samples. Puget Sound protocols, prepared by tetra tech in. for the United States Environmental Protection Agency.

*Manuscrit reçu le 2 novembre 2007
Version modifiée acceptée le 22 octobre 2008*