

Contamination en métaux traces des sédiments du lac Fouarat (Maroc)

H. Ben Bouih^{1,2,*}, H. Nassali¹, M. Leblans² et A. Shiri¹

¹*Laboratoire d'Electrochimie et des Etudes d'Environnement, département de Chimie, Faculté des Sciences, BP133 Kénitra, Maroc*

²*Laboratoire des Géofluides-Bassins-Eaux, Maison de l'Eau, Faculté des Sciences, Montpellier, France*

(Reçu le 19 Octobre 2004, accepté le 12 Décembre 2004)

* correspondance et tirés à part, e-mail : bouih6@yahoo.fr

Résumé

Les agglomérations urbaines de la ville de Kénitra sont susceptibles de perturber l'équilibre écologique du lac Fouarat, à cause de leur essor démographique et industriel. Les sédiments du lac Fouarat ont été prélevés et analysés dans le but de déterminer leurs principales caractéristiques. La teneur en métaux et les paramètres chimiques ont été évalués dans la fraction inférieure à 63 µm.

Les résultats obtenus montrent que les concentrations métalliques trouvées sont supérieures aux concentrations relevées par d'autres travaux sur des témoins (non pollués). La comparaison entre les teneurs en métaux dans les sédiments du fond et ceux de surface d'une carotte montre que les teneurs en zinc, en chrome et en cadmium diminuent de la surface vers la profondeur.

L'intensité de cette pollution est traduite par le facteur et l'indice de contamination qui montrent une nette contamination de sédiments du lac Fouarat.

Mots-clés : *lac Fouarat, sédiments fins, métaux lourds, caractéristiques physico-chimiques, Pollution.*

Abstract

Metals trace contamination in lake Fouarat sediments (Morocco)

Large agglomerations of Kénitra city may upset the equilibrium of Fouarat lake because of population and industrial growth. Sediments from Fouarat lake have been therefore analyzed to determine their main characteristics as well as their heavy metals

content; the latter has been evaluated in the fraction below 63 μm .

The results obtained by the dosage of heavy metals show that sediments are loaded. These values are exceeding limits values noted in sediments non-polluted.

The intensity of this pollution is reflected in the factor and evidence of contamination showing important metals contamination in the Fouarat lake.

Keywords: *Fouarat lake, fine-grained sediments, heavy metals, physico-chemical characteristics, Pollution.*

1. Introduction

La pollution par les métaux lourds est un problème d'actualité qui préoccupe toutes les régions soucieuses de maintenir leur patrimoine hydrique à un haut degré de qualité. Cette préoccupation touche la région du Gharb qui constitue un pôle économique capital au Maroc, de par ses réserves en eaux superficielles et souterraines et d'autre part, par la qualité des terres fertiles. Cette région comporte plusieurs dépressions humides. Le lac Fouarat constitue une de ces principales dépressions. C'est dans cette optique que nous nous sommes intéressés à l'évaluation du degré de pollution métallique des sédiments de ce site.

En effet, le lac Fouarat est situé au Nord-Est de la ville de Kénitra, sur la zone de protection, du champs captant Ahmed Taleb [1], élaborée par le projet de protection des ressources en eaux potables, établi par l'Office National de l'Eau Potable [2]. Ce lac constituait par le passé un lac naturel où divers types d'oiseaux migrateurs trouvaient un milieu favorable pour leur repos et leur reproduction. Les déversements des effluents bruts d'eaux usées (domestiques et industrielles) ainsi que le lessivage agricole ont transformé ce lac en un vrai exutoire [3-6].

Les risques de contamination de la nappe phréatique sous-jacente qui alimente cette région en eau potable et de transfert des polluants vers l'estuaire de Sebou nécessite une étude détaillée de ce système.

2. Matériels et méthodes

2-1. Stations et techniques de prélèvement

Sept stations de prélèvement ont été retenues dans le cadre cette étude, dont cinq (S2 à S5, S7) sont situées dans l'axe principal du lac, suivant l'écoulement qui se fait du Sud-Est (Oued Fouarat) vers le Nord-Ouest (estuaire de Sebou). La sixième station (S6) a été choisi du côté culture au nord (loin des rejets). La septième station (S1) a été choisie sur

le fleuve Fouarat comme une station de référence loin des apports anthropiques domestiques, industriels et agricoles (*Figure 1*). Ces stations ont été sélectionnées en fonction leur accessibilité et la proximité des rejets polluants.

Les prélèvements des échantillons de sédiments superficiels ont été effectués au cours de quatre campagnes, deux en période d'étiage (01/09/98 et 20/09/98) et deux en période de crue (10/02/99 et 30/05/99), à bord d'une barque et à l'aide d'une benne à main, en prenant les précautions citées ci-dessous recommandées par le Bureau de Recherche Géologiques et Minières d'Alsace [7] :

- Utilisation d'un couvercle évitant le lessivage par les eaux de la partie supérieure ;
- Les bords de l'échantillon sont éliminés ;
- Les prélèvements des sédiments de surface ont été effectués sur la couche superficielle (deux premiers centimètres) pour deux à trois points espacés de 6 mètres, sous les différentes épaisseurs d'eau (*Tableau 1*).

Tableau 1 : *La profondeur moyenne des eaux du lac Fouarat au cours de la période d'étude*

Station	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Profondeur (m)	1,07	1,27	0,97	0,97	1,70	0,87

Ces échantillons sont recueillis dans des sacs en plastique et brassés jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène de la station étudié.

Les sédiments de la carotte ont été prélevés en aval de la station 7 (a) (*Figure 1*) par carottage manuel à l'aide d'un carottier de longueur 2 m 50 cm et de diamètre 15 mm. Le carottage ne peut pas dépasser 40 cm de profondeur limite au-delà de laquelle nous ne pouvons plus carotter avec le matériel dont nous disposons.

2-2. Technique d'analyse

Les échantillons ont été conservés, depuis le prélèvement jusqu'au laboratoire, dans une glacière portable à 4 °C. Au laboratoire nous avons procédé à l'élimination des cailloux et des débris végétaux à l'aide d'un tamis de taille de 2 mm de diamètre. Le sédiment humide est tamisé sur un tamis de 63µm de diamètre et séché à l'étuve à 90°C. La fraction fine a été choisie suivant deux critères :

- Les métaux s'associent le plus à la fraction fine ;
- La différence granulométrique entre la station 1 de nature sableuse et les autres stations de nature fines implique l'utilisation et le choix d'une fraction uniforme.

Le sédiment traité a subi par la suite plusieurs analyses dont le dosage des métaux lourds et les paramètres chimiques (Pt, M.O,...).

Le dosage du carbone a été réalisé par la méthode Anne [8] qui consiste en une oxydation du carbone organique par un mélange de dichromate de potassium et d'acide sulfurique. L'excès de dichromate a été titré par une solution de sel de Mohr. La matière organique a été déterminée par perte au feu à 550 °C [8]. Le carbonate de calcium a été dosé par calcimétrie. Le taux de calcaire est calculé en fonction du volume de CO₂ dégagé par action de HCl (50%) sur le sédiment [8]. Le phosphore total a été déterminé après une minéralisation par une solution de K₂S₂O₈ (100g/L) et d'acide sulfurique concentré, le phosphore libéré est dosé par la méthode colorimétrique décrite par J. Rodier [9].

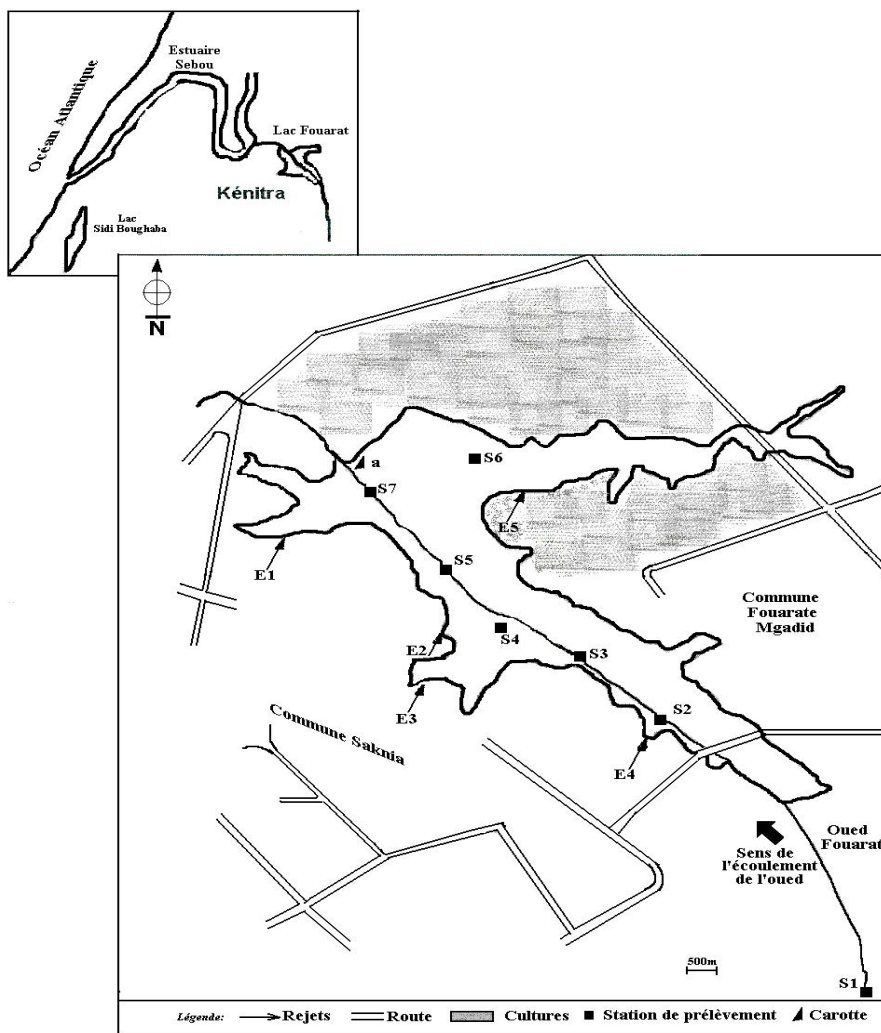


Figure 1: localisation des sites de prélèvement des différents sédiments étudiés

La digestion des sédiments a été réalisée, à l'aide d'un four à micro-ondes, par mélange d'acides forts : HF-HNO₃-HClO₄ dans les proportions (4-5-1) mL [10]. Les solutions obtenues ont été analysées par un spectromètre de masse à plasma couplé inductivement à haute performance (ICP-MS) type VG plasma. Les standards artificiels ont été analysés en même temps que les échantillons, afin de vérifier la qualité des analyses en vue de leur validation.

3. Résultats et discussion

Pour chaque paramètre étudié, nous avons tracé la courbe d'évolution de la moyenne des teneurs calculées sur les quatre campagnes de prélèvement effectuées pour chaque station.

3-1. Caractéristiques physico-chimiques des sédiments

Les pH des sédiments du lac Fouarat sont neutres à légèrement alcalins (figure 2). Ce caractère neutre à basique reflète bien la nature des sédiments, dominée par les terrains calcaires et argileux. Les fluctuations du pH ne dépassent pas l'unité au cours des quatre campagnes de prélèvement pour la majorité des stations, ce qui rend compte du pouvoir tampon que présentent ces sédiments.

La conductivité des sédiments du lac Fouarat oscille en moyenne entre 650 et 1261 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (figure 3). Elle augmente de la station 1 (station de référence) à la station 2, cette augmentation pourrait être due au fait que les sédiments du lac Fouarat sont riches en ions monovalents et divalents qui proviendraient des divers rejets domestiques et industriels.

Les résultats relatifs à la teneur en eau de sédiments étudiés montrent une fluidité importante de ces sédiments (une moyenne varie de 40 à 80%) (Figure 4). Les valeurs enregistrées de la fraction péltique au niveau des sédiments du lac Fouarat montrent que ces sédiments sont constitués uniquement par la fraction fine (une moyenne supérieure à 90%) (Figure 4).

Les teneurs en matière organique montrent que les sédiments étudiés sont assez chargés en M.O dont la majeure partie est constituée de carbone organique (figure 5) et dont le rapport M.O/C.O varie entre 1,2 et 2. Ce résultat peut s'expliquer par l'influence des eaux usées chargées en matière organique. En effet, des fluctuations observées au niveau des stations entre la période de crue et la période d'étiage sont probablement dues au lessivage important des sols par les eaux de pluies et par le retour des eaux d'irrigation des terrains agricoles environnant le lac, riches en substances organiques.

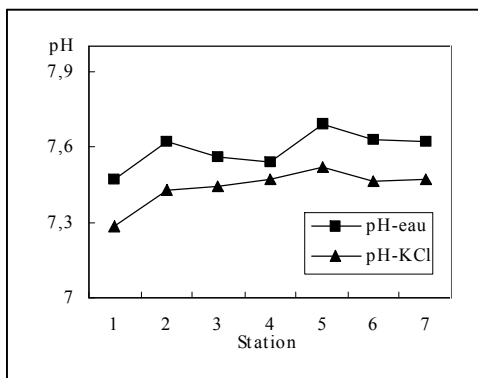


Figure 2 : Variation spatiale du pH moyen (pH-eau et pH-KCl)

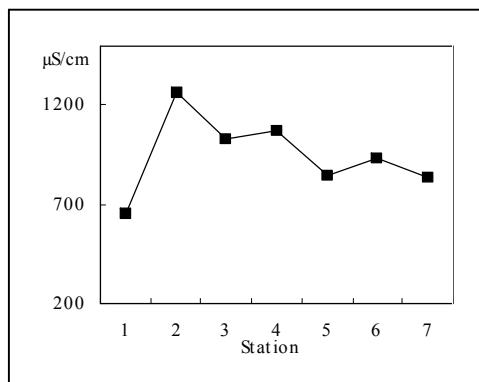


Figure 3 : Variation spatiale de la conductivité moyenne

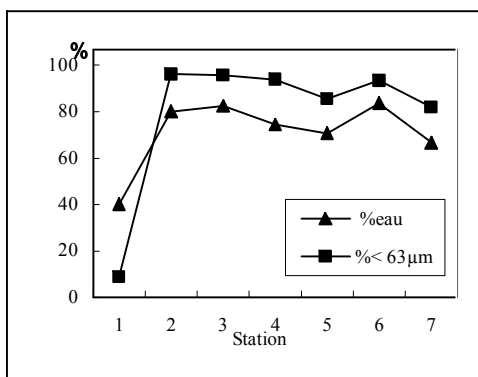


Figure 4 : variation spatiale des pourcentages moyens de la teneur en eau et en fraction <math>< 63 \mu\text{m}</math>

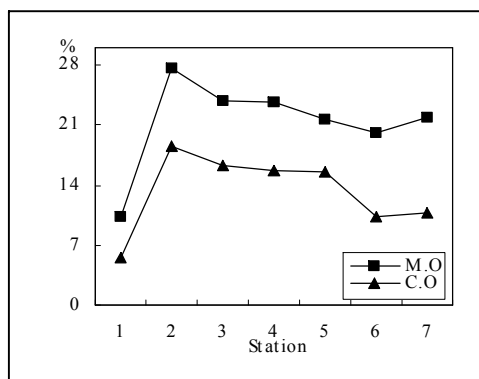


Figure 5 : Variation spatiale des pourcentages moyens en matière organique et en carbone organique

Les teneurs moyennes obtenues en carbonate varient de 16 à 33% (Figure 4). Ces carbonates sont abondants dans la fraction grossière (station 1) qui est accompagnée d'un faible pourcentage en matière organique [3].

Les résultats de l'analyse du phosphore total dans les sédiments étudiés montrent que ces sédiments sont chargés en cet élément. La plus forte teneur a été enregistrée au niveau de la station 6 (Figure 5). Ce résultat peut s'expliquer par la proximité de cette station des terrains agricoles avoisinant le lac qui reçoit les eaux lessivées des terrains riches en fertilisants phosphatés [3]. En effet, l'essentiel du phosphore est associé aux particules fines qui constituent la fraction prédominante des sédiments étudiés [11]. D'un autre côté, la décantation des particules autochtones riches en phosphore (phyto et zooplancton) contribuent à l'enrichissement du sédiment en cet élément.

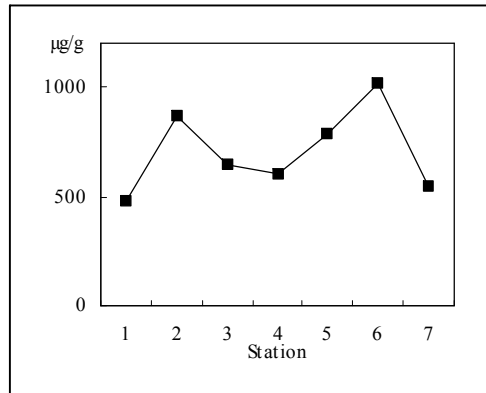
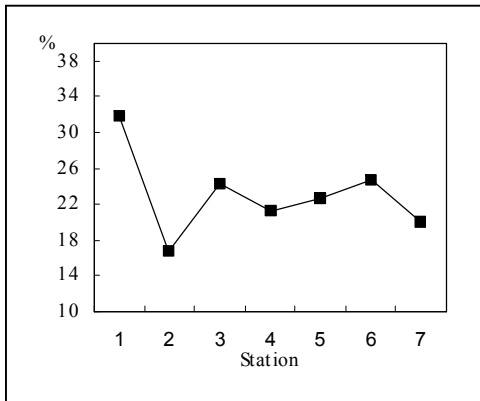


Figure 6 : *variation spatiale de la teneur moyenne en carbonates*

Figure 7 : *variation spatiale de la teneur moyenne en phosphore total*

3-2. Analyse des métaux dans les sédiments superficiels du lac Fouarat

Chrome : le maximum du chrome a été enregistré à la station 7 (figure 8) située à la sortie du lac vers l'estuaire (aval du lac). La forte charge des eaux usées de la ville de Kénitra explique ce résultat. Les analyses effectuées aux niveaux des rejets (E3 et E4, Figure 7) ont révélés 58 µg/L et 98µg/L [12].

Cuivre : les valeurs trouvées en cuivre sont variables d'une campagne à l'autre. Les fortes teneurs en cuivre ont été obtenues au niveau de la station 4 (Figure 8) en aval du rejet E3 riche en cuivre (45 µg/L de Cu) [12].

Zinc : comme pour le cuivre les teneurs maximales en zinc ont été enregistrées à la station 4 (Figure 8); elles peuvent être affectées à la charge polluante apportée par le rejet E3 (498mg/L de Zn) [12]. L'important apport en zinc est le résultat du déversement des eaux usées de la ville de Kénitra notamment le lessivage des ordures ménagères incontrôlées au bord du lac. En effet, le zinc forme de 44 à 47% des piles et accumulateurs, 12 à 13% des produits ferreux protégés par zinc contre la corrosion, 11 à 13% des caoutchoucs, 8 à 9% des papiers-carton, etc [13]. D'autre part, les sols cultivés peuvent contribuer dans l'apport en Zn. En effet, les fertilisants utilisés sont responsables de cet apport. Les travaux de [14] ont montré que les fertilisants à base azotée-phosphatée peuvent contenir jusqu'à 83,3 mg de Zn/Kg de fertilisants.

Cadmium : les teneurs moyennes obtenues en cadmium oscillent entre 0,05 et 0,81 µg/g (Figure 8). La charge en cet élément peut avoir une origine atmosphérique, agricole et/ou urbain. En effet, les analyses effectuées sur les rejets E3 et E4 [12] ont révélé des teneurs de 10,8 µg/L au niveau de E3 et 3,8 µg/L au niveau de E4. Le lessivage du sol

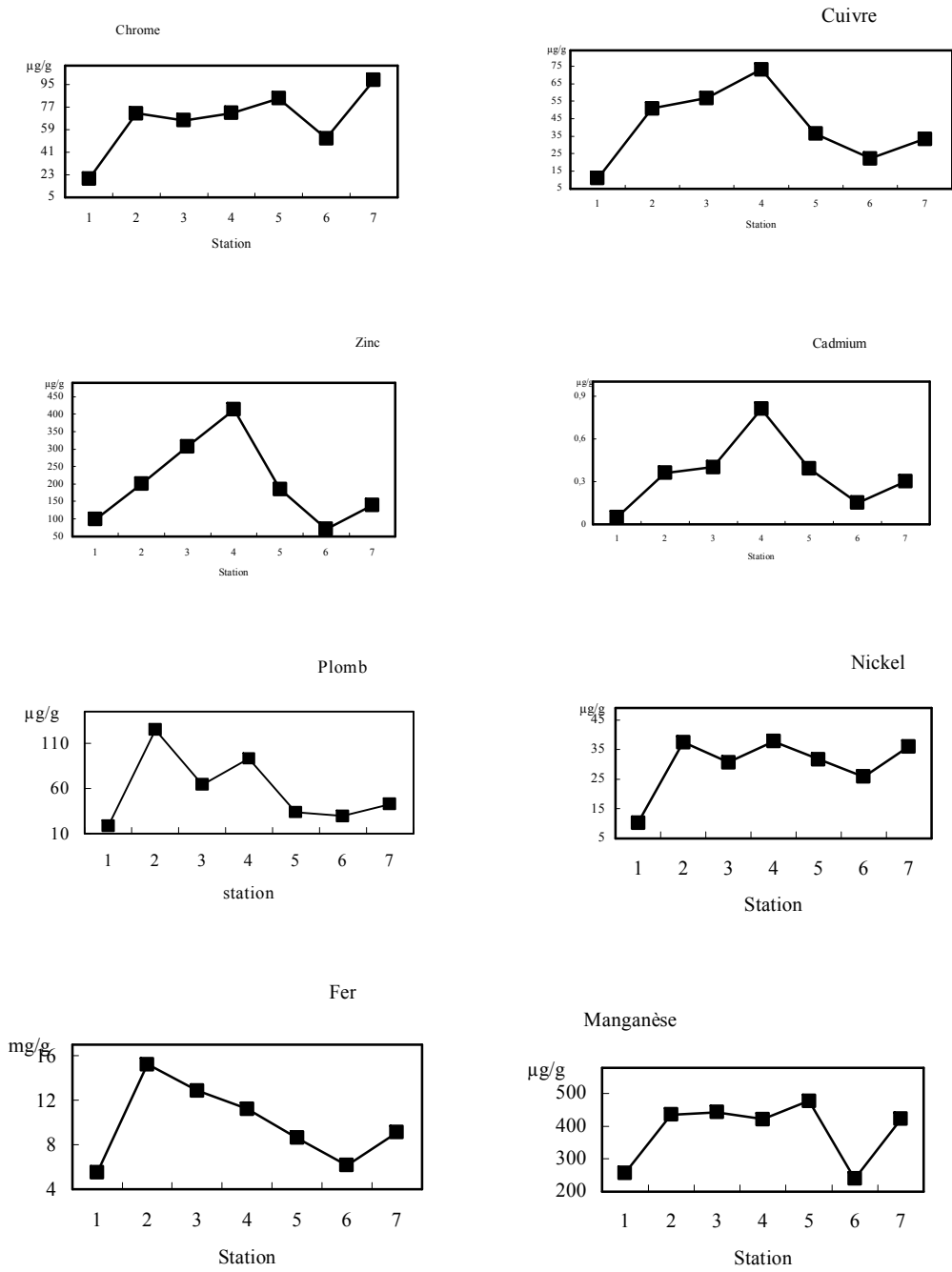


Figure 8 : *Variations spatiales des teneurs moyennes en chrome, en cuivre, en zinc, en cadmium, en plomb, en nickel, en fer et en manganèse dans les fractions < à 63µm.*

fertilisé peut aussi constituer une source d'apport de cadmium. En effet, les analyses des métaux sur les fertilisants phosphatés et potassés ont révélé des teneurs allant jusqu'à 6,3 mg de Cd/Kg [15].

Plomb : les résultats de l'analyse du plomb dans les sédiments du lac Fouarat montrent que les teneurs oscillent entre 4 µg/g et 337 µg/g pour les quatre campagnes de prélèvement, avec une moyenne variant de 18 à 125 µg/g (*Figure 8*). On note une teneur particulièrement élevée au niveau de la station 2. Cette teneur pourrait être due aux gaz d'échappement des véhicules [16]. Rappelons que cette station se situe en aval du pont où la circulation est permanente.

La contamination du système étudié par le plomb semble provenir du plomb utilisé dans les filets des pêcheurs et égaré au fond du lac, sans négliger l'apport du déversement des eaux usées [6,12].

Nickel : Les teneurs moyennes en ce métal dans les sédiments étudiés sont comprises entre 10,2 µg/g (station 1) et 37,7 µg/g (station 4) (*Figure 8*). Les concentrations trouvées en nickel ne sont donc pas susceptibles de perturber l'équilibre écologique du milieu étudié.

Fer : Le fer est le métal le plus abondant dans les sédiments du lac Fouarat où les teneurs moyennes peuvent atteindre 15,2 mg/g dans la station 2, alors que la teneur la plus faible obtenue est de l'ordre 5.5 mg/g dans la station 1 (*Figure 8*). L'enrichissement en fer est dû au contexte géologique régional [17]. La même étude a montré que le sol de cette région est plus ou moins hydromorphe, la roche mère est constituée par la formation rouge (argile sableuse rouge), elle est surmontée par un horizon d'accumulation argilo-férrique provenant du lessivage de l'horizon supérieur. En effet, les analyses effectuées sur les rejets (E3 et E4) ont révélé des teneurs inférieures à celle trouvée dans la station de référence [12] (respectivement 2,8 et 3 mg/L).

Par ailleurs, la présence du fer dans les sédiments de toutes les stations est habituelle, puisque ce dernier est essentiellement lié d'une part à la structure des silicates (avec une moyenne de 60%) qui font partie des principaux constituants des sédiments [3].

Manganèse : Les teneurs moyennes en manganèse oscillent de 257 à 477 µg/g (*Figure 8*). Les fortes concentrations sont enregistrées en crue. Ceci est probablement dû au lessivage des sols, avoisinant le lac, riches en manganèse. La variation moyenne du manganèse dans les sédiments est très irrégulière et ne semble pas être liée seulement aux rejets de l'agglomération de Kénitra.

Les différents résultats obtenus pour les métaux lourds permettent de remarquer que les teneurs en ces éléments métalliques sont importantes sur la zone influencée par les rejets (S2 à S5 et S7) sauf la station 6. La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus à la station témoin, prise sur l'oued Fouarat qui alimente le lac et qui ne reçoit aucun

rejet, permet de mettre en évidence une contamination du lac par les eaux usées qui y sont déversées.

La comparaison des teneurs en métaux étudiés du lac Fouarat (moyenne de S2 à S7 durant la période d'étude) avec d'autres lacs maghrébins (*Tableau 2*) permet de mettre en exergue l'ampleur de la pollution métallique causée par des rejets domestiques et le lessivage agricole, d'autres activités [4] (garagistes de la mécanique, ateliers de traitement de surface des véhicules par la peinture, stations de distributions de pétrole, une industrie de textile et une industrie de la fabrication des canalisations en béton).

Tableau 2 : *Comparaison des teneurs en métaux dans les sédiments du Fouarat avec d'autres lacs*

	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Mn	Réf
Lac Ichckel (Tunisie)	100	20	180	1.0	60	50	300	[18]
Lac GharEl Melh (Tunisie)	80	15	100	1.5	-	0.2	200	[19]
Lac Moulaye Bouseham (Maroc)	-	26	117	-	14	-	-	[20]
Lac Fouarat (Maroc) (cette étude)	73,9	45,5	219	0,4	64,6	33,2	407	-

Les sédiments peuvent constituer une source interne de contamination par métaux par le biais du phénomène de remobilisation qui dépend de la liaison métal-sédiment et des paramètres physico-chimiques. Les sédiments du lac Fouarat se caractérisent par une forte association du Cr (50%), Zn (50%), Cu (40%), Ni (60%) et Fe (60%) avec les silicates en période de crue [3]. Ceci montre le faible relargage de ces métaux en cette période. [3,5] ont mis en évidence l'affinité de ces métaux avec la phase carbonatée échangeable, les oxy-hydroxydes de Fe et Mn et la matière organique en période d'étiage.

Ce qui montre le risque potentiel de remobilisation de ces métaux au cours de cette période au moindre changement des conditions physico-chimiques (pH acide, décomposition de la matière organique, ...). Heureusement, les eaux du lac Fouarat présentent des pH neutres ou alcalins grâce à l'abondance des formations carbonatées.

3-3. Analyse des métaux dans les sédiments sous-jacents du lac

L'analyse des sédiments fins superficiels a permis de donner une photographie dans l'espace de différentes teneurs en métaux polluants. Afin d'avoir une idée du phénomène dans le temps, une carotte à été réalisée en septembre 1999 au niveau de la station (a) (*Figure 1*) située en aval de la station 7 (sortie du lac vers l'estuaire).

Les résultats obtenus sur les 40 premiers centimètres (*Figure 9*) montre que les teneurs en Cr, Zn et Cd augmentent en passant des sédiments profonds vers ceux de l'interface. Ces teneurs tendent à se stabiliser dans les couches profondes. Ceci montre qu'il y a un enrichissement progressif des couches superficielles, probablement due aux rejets déversés dans le lac.

On note un pic qui caractérise le niveau 34 cm (0,34 µg/g) pour le cadmium. Ceci est expliqué par la forte charge des eaux usées en cet élément à une certaine époque.

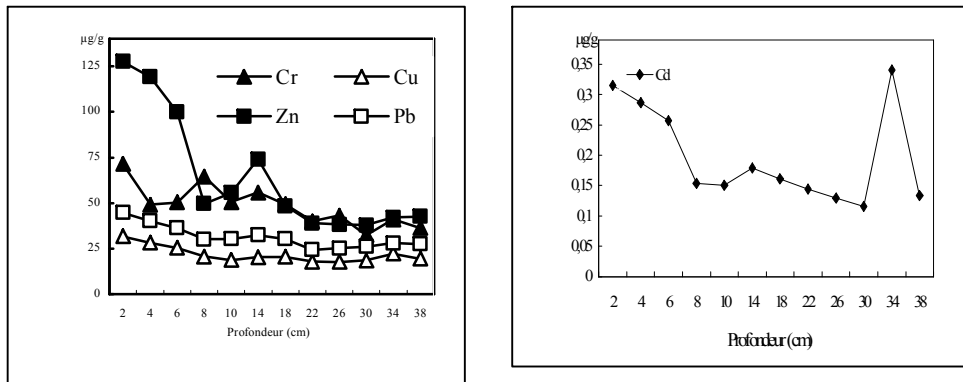


Figure 9 : Evolution des teneurs en métaux lourds (Cu, Zn, Cr, Pb et Cd) du sommet vers le bas de la carotte.

3-4. Evaluation du degré de contamination des sédiments du lac

L'appréciation de la pollution, au moyen de la seule détermination des teneurs métalliques dans les sédiments, est une approche peu significative. C'est ainsi que Boust et al. [21] et Belamie et al. [22], expriment la contamination métallique à l'aide du facteur de contamination F_m (Teneur mesurée/teneur de référence, avec $F_m > 1$) et de l'indice de contamination I_m , soit :

$$I_m = \frac{1}{n} \sum F_m \tag{1}$$

avec n , le nombre d'éléments analysés. Ces auteurs suggèrent qu'il y a un début de contamination pour $I_m > 2$.

L'analyse des résultats obtenus (*Tableau 3*) montre que les indices moyens de contamination des stations étudiées, à l'exception de la station 6, sont compris entre 3 et 5,5. Ces valeurs traduisent la forte contamination métallique des sédiments superficiels du lac Fouarat. La station 6 dont l'indice I_m est 1,8 est peu touchée par cette pollution vu sa position éloignée des rejets et du sens de l'écoulement.

Tableau 3 : *Facteur et indice de contamination des stations 2 à 7 obtenus à partir des données brutes*

	Station 2		Station 3		Station 4		Station 5		Station 6		Station 7	
	Fm	Im	Fm	Im	Fm	Im	Fm	Im	Fm	Im	Fm	Im
FE	2,77		2,58		2,04		1,57		1,10		1,65	
Zn	2,52		3,91		5,24		2,35		0,90		1,76	
Pb	6,86		3,52		5,09		1,83		1,60		2,33	
Mn	1,96	4,16	1,72	3,91	1,64	5,49	1,86	3,20	0,83	1,80	1,64	3,12
Ni	3,67		3,00		3,69		3,10		2,40		3,52	
Cu	4,63		5,17		6,65		3,30		2,03		3,04	
Cd	7,20		8,00		16,2		7,80		2,90		6,03	
CR	3,66		3,38		3,44		3,69		2,50		5,02	

3-5. Analyse en composantes principales (ACP)

Ordination des stations du lac Fouarat sur la base des métaux

Dans le but de connaître les mécanismes d'enrichissement des sédiments du lac Fouarat et leurs supports privilégiés (carbone organique, carbonates,...), nous avons procédé à une analyse en composante principale. Cette dernière est effectuée sur une matrice des données constituée de 28 prélèvements (7 stations x 4 campagnes) au cours desquels huit éléments ont été mesurés. Cette analyse montre que l'axe principale F1 (horizontal) qui représente 53% de la variance exprimée est caractérisé en positif par le plomb ($r = 0,57$), le nickel ($r = 0,60$), le chrome ($r = 0,78$), le zinc ($r = 0,40$) et le cuivre ($r = 0,30$) et en négatif par les autres métaux. A la lumière de ces résultats, il apparaît que l'axe F1 définit un axe de pollution métallique très marqué dans le sens positif dont le pôle positif se place du côté Cr-Ni (*Figure 10*).

Par ailleurs, la répartition des points de prélèvements de part et d'autre de l'axe F1 montre l'existence de trois groupes (*Figure 10*). Le premier groupe composé de S71, S72, S73, S74, S51, S52 (stations aval), chargé en nickel et chrome. Le second groupe comprend les stations amont (S21, S22, S23, S24, S31, S32, S33, S34, S42, S43, S44), riches en cadmium, plomb, zinc et cuivre. Le troisième groupe représente les stations S52 et S53, riches en manganèse.

Les stations (S1i et S6i) figurent en bas de l'axe F2 (19% de la variance) indiquant un enrichissement en fer ($1 \leq i \leq 4$: représente les quatre campagnes de prélèvement).

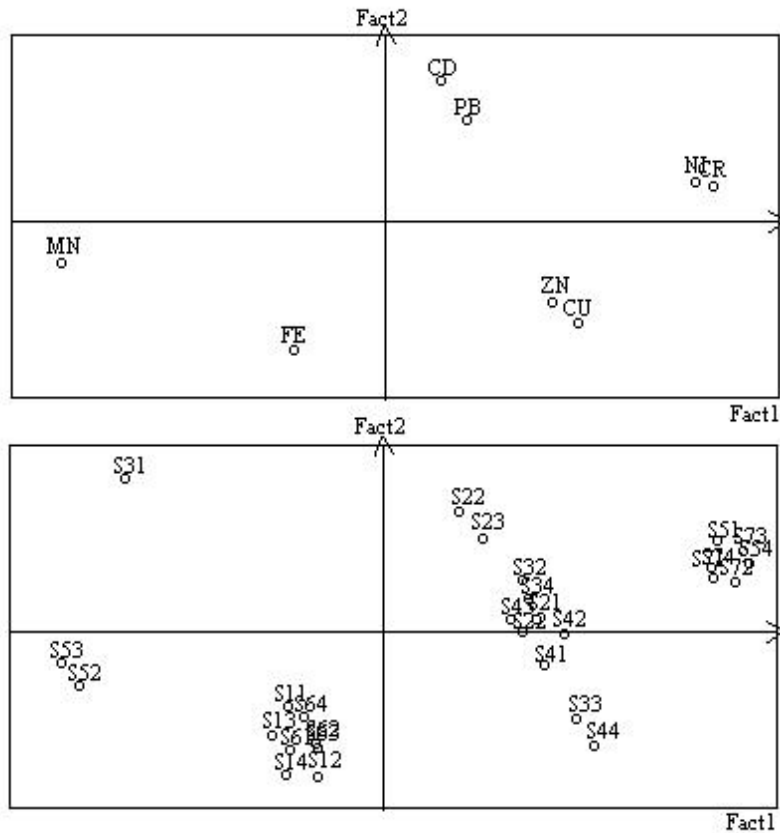


Figure 10 : *Représentation dans le plan F1 x F2 des descripteurs et des points de prélèvements*

3-6. Corrélation entre les métaux et les paramètres physico-chimiques

La matrice de corrélation entre les métaux étudiés et les paramètres physico-chimiques (*Tableau 6*) montre que ces corrélations sont supérieures au seuil de « significabilité ».

- La corrélation entre la fraction fine (< à 63 µm) et la plupart des métaux est assez bonne ($r > 0,60$). Ce résultat vient corroborer les études antérieures stipulant que les métaux s'associent de préférence à la fraction la plus fine du sédiment [23,24].

- Le plomb, le cuivre et le cadmium montrent une affinité avec les carbonates (calcite) et le carbone organique ($r > 0,50$).

- Les corrélations entre le zinc, le fer, le chrome, le carbone organique et les

carbonates sont très faibles. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que ces métaux préfèrent d'autres supports par exemple les silicates, les oxy-hydroxydes de fer et de manganèse [3].

Tableau 6 : Matrice des corrélations totales des métaux avec les paramètres physicochimiques

	pH eau	PH KCl	% eau	% < 63µ	% M.O	% C.O	%Ca CO3	Fe	Zn	Pb	Mn	Ni	Cu	Cd	Cr
pH-eau	1														
	0.81	1													
pH-KCl	0.74	0.72	1												
	0.91	0.90	0.77	1											
%eau	0.02	0.00	0.02	-0.0	1										
	0.78	0.81	0.72	0.87	0.85	1									
%< 63µ	0.92	0.73	0.70	0.83	0.01	0.69	1								
	0.07	-0.1	0.13	0.02	0.18	-0.1	0.15	1							
m	0.17	0.19	0.15	0.18	-0.1	0.17	-0.0	0.15	1						
%M.	0.59	0.58	0.43	0.58	0.02	0.58	0.53	-0.1	0.18	1					
O	-0.3	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.2	-0.1	0.31	-0.3	-0.3	1				
%C.	0.48	0.29	0.25	0.33	0.02	0.28	0.21	-0.2	0.30	0.18	-0.4	1			
O	0.55	0.50	0.40	0.69	-0.1	0.51	0.50	0.9	0.60	0.25	0.1	0.15	1		
%Ca CO3	0.57	0.55	0.53	0.60	0.1	0.57	0.51	-0.2	-0.1	0.58	-0.2	0.29	-0.4	1	
	0.52	0.36	0.26	0.48	0.05	0.39	0.34	-0.2	0.35	0.16	-0.4	0.71	0.12	0.3	1
Fe														1	
Zn														1	
Pb														1	
Mn														1	
Ni														1	
Cu														1	
Cd														1	
Cr														1	

- La bonne corrélation entre la plupart des métaux analysés et le pH ($r \geq 0,5$ pour le Ni, Pb, Cu, Cr) permet de relever l'influence de cette variable sur la répartition des éléments métalliques dans les sédiments.

En se basant sur les données de cette matrice (*Tableau 6*), nous avons regroupé tous les métaux dont l'évolution peut être considérée comme comparable dont le but de minimiser les paramètres à suivre dans les prochaines études et d'adopter une stratégie de décontamination de ce site.

Groupe I : comprend le nickel et le chrome ($r = 0,71$).

Groupe II : comprend le cadmium et le plomb ($r = 0,58$).

Groupe III : comprend le zinc et le cuivre ($r = 0,60$).

Groupe IV : comprend le fer et le cuivre.

Groupe V : comprend le manganèse seul.

4. Conclusion

Les résultats obtenus dans ce travail nous ont permis de faire une évaluation de la contamination métallique des sédiments du lac Fouarat. L'analyse physico-chimique des sédiments superficiels, a montré que ce lac connaît une pollution organique importante qui se fait sentir de façon très nette au niveau des sédiments. On notera également que ces sédiments sont formés essentiellement par des matériaux fins.

Le stockage du phosphore total dans les sédiments étudiés a mis en évidence l'importance de l'accumulation de cet élément, ainsi que son rôle dans la prolifération algaire responsable de l'eutrophisation.

Les concentrations des métaux trouvées dans les sédiments sont supérieures aux concentrations relevées par certains auteurs, au niveau des sédiments considérés comme non pollués. Par ailleurs la station 1 (station de référence) loin de toute perturbation, présente les teneurs les plus faibles, avec une différence significative dans les valeurs comparée aux autres stations. Le calcul de l'indice de contamination et du facteur de contamination qui tiennent compte des teneurs de la station de référence confirme une contamination métallique des sédiments du lac Fouarat.

La comparaison entre les teneurs en métaux dans les sédiments de profonde et ceux de surface de la carotte montre un gradient d'appauvrissement du haut vers le bas pour le zinc, le chrome et le cadmium. En effet, l'enrichissement des premiers centimètres en ces métaux, indique l'existence d'un apport métallique récent. Ce résultat est attribué qu'aux activités humaines. Le cuivre et le plomb ne présentent pas un tel gradient de la surface vers le fond.

Références

- [1] - B. El Mansouri, Y. Loukili, D. Esselaoui *« Une approche numérique des périmètres de protection des captages des eaux souterraines »*, Académie des Sciences, 328 (1999) 695-700.
- [2] - ONEP. *« Dossier technique relatif à la détermination des zones de protection rapprochées et éloignées du champ captant Ahmed Taleb »*, Office national de l'Eau Potable (1995) 61p.

- [3] - H. Ben Bouih, « *Contribution à l'évaluation de la pollution métallique des zones humides de la région du Gharb, cas du lac Fouarat* », Thèse de Doctorat, Université Ibn Tofaïl, Kénitra (2000) 200p
- [4] - O. Hakam, H. Ben Bouih, H. Nassali et al. « *Qualité des eaux naturelles dans la région de la ville de Kénitra* », Revue Génie Civil Marocaine, 89 (2000) 54-61
- [5] - H. Ben Bouih, H. Nassali, A. Srhiri, « *Spéciation chimique du zinc et du cuivre dans les sédiments superficiels du lac Fouarat au Maroc* », Journal de la Société Chimique de Tunisie, 4 (10) (2001) 1279-1286
- [6] - H. Nassali, H. Ben Bouih, A. Srhiri, « *Used water impact on Fouarat Lake* », Bulletin d'Information de l'Association Marocaine de Catalyse et Environnement, B.I.A.M.C.E. Tome 2, N°1 (2000) 566-579
- [7] - B.R.G.M./S.G.A.L. « *Inventaire du degré de pollution des sédiments des cours d'eau* », Bureau de Recherche Géologique et Minière, Service Géologique Régional Alsace, (1982) 80 p.
- [8] - G. Rofes « *Etudes des sédiments : Méthodes de prélèvement et d'analyse pratiques au laboratoire de sédimentologie* ». Centre Technique de Génie Rural des eaux et des Forêts (1980)
- [9] - J. Rodier « *Analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer* » Paris : 7ème édition, Dunod (1984) 700p
- [10] - H.D.Fielder, J.F. Lopez-Sanchez, G. Rubio et al. « *Study of extractable trace metal contents in a river sediments using sequential extraction* », Analyst, 119 (1994) 1109-1114
- [11] - H. Ben Bouih, M.Z. Benabdellah, A. Srhiri « *Contribution à l'étude de l'adsorption du phosphore sur les sédiments de l'estuaire de Sebou au Maroc* », Revue Africa Geoscience, 6 (1999) 283-289
- [12] - H. Nassali, H. Ben Bouih, A. Srhiri. « *Effect of waste water on the degradation of water quality in the case of Fouarat lake in Morocco* » Proceeding of International Symposium on Environmental Pollution Control and Waste Management, Tunis (2002) 3-14
- [13] - A. R. Rousseaux, A. Navaro, P. Vermande. « *Distribution des sept principaux métaux lourds dans les constituants des ordures ménagères* », Etudes et mémoires, Tribune de l'eau : (1991) 17-25
- [14] - A.R Mermut, J.C. Jain, L. Song, R. Kerrich, L. Kozak, S. Jana. « *Trace element concentrations of select soils and fertilizers in Saskatchewan* », Canada. Environ. Qual. 25 (1996) 845-853
- [15] - K. P Raven, R.H Leoppert. « *Trace element composition of fertilizers and soil Amendments* », Enviro. Qua. 26 (1997) 551-557

- [16] - A. Abdallaoui. « *Contribution à l'étude de la pollution des cours d'eau marocains par les métaux lourds : cas de l'oued Boufekrane* », Thèse de 3^{ème} cycle, Université Moulay Ismaïl, Meknès (1990) 258p.
- [17] - P. Thauvin « *Monographie hydrogéologique de la Mamora , Maroc* ». Notes et Mémoires du Service géologique, N°195 (1966) p18.
- [18] - N. Ben M'Barek « *Impact des ouvrages sur l'équilibre de l'écosystème : Lac Ichkeul* », Mémoire de DEA, Université de Tunis II (1995) 97p
- [19] - S. Azzaoui « *Géochimie de certains métaux lourds dans les sédiments de la lagune de Ghar el Melh (N-E, Tunisie)* », Mémoire de DEA, Université de Tunis II (1993) 100p.
- [20] - M. Carruesco « *Comportement de quelques éléments métalliques dans les sédiments superficiels du lac Moulaye Bouselham* », Bull. Inst. Géol. Bassin d'aquitaine, 24 (1978) 34-48
- [21] - D. Boust, J. M. Jouanneau, C. Latouche « *Méthodologie et interprétation des teneurs totales en métaux traces contenus dans les sédiments estuariens et littoraux* », Bull. Inst. Géol. Bassin d'aquitaine ; 30 (1980) 71-86
- [22] - R. Belamie, S. Phelippot, CEMAGREF. Division Qualité des Eaux, Pêche et pisciculture; Rap. N°16 (1982) 8
- [23] - M. Saadallah « *Contribution à l'étude de la pollution métallique des sédiments des cours d'eau Marocains : cas de l'oued Boufekrane* », Thèse de troisième cycle, Université Moulay Ismail, Méknés (1991) 181 p
- [24] - I. N. Solodov, V. Z. Aleksand, P. M. Aleksand, D. K. Aleksand et R. T. Boris « *Geochemistry of naturel and contaminated subsurface waters in the lake Karacai, Southern Urals, Russia* », Applied geochemistry, Vol. 13, N°8 (1998) 921-939.