

Contamination métallique de l'eau et du sédiment d'Oued Bouhamra

Metal contamination of water and sediment from Wadi Bouhamra

Soumeya Khaled-Khodja^{*1}, Mohamed-El Hadi Samar², Gaël Durand³

¹ Laboratoire de Génie Géologique, Equipe : Eau-Environnement, Université de Jijel
BP 98, Ouled Aissa, Jijel, 18000, Algérie.

² Département de Génie des Procédés, Université Badji-Mokhtar, BP 12, Annaba, 23000, Algérie.

³ Laboratoire public Conseil Expertise et Analyses en Bretagne, 120 av. Alexis de Rochon, C.S. 10052, 29280
Plouzané, France.

Soumis le : 04/10/2015

Révisé le : 03/01/2016

Accepté le : 12/01/2016

ملخص

تتعرض المسطحات المائية إلى تلوث كبير بالمعادن الثقيلة المتواجدة في النفايات السكانية و الزراعية و الصناعية. من أجل معرفة تركيز هذه الملوثات المعدنية الخطيرة في مياه و تربة "وادي بوحمره" الذي يعد من أهم الأودية المتسببة في تلوث مياه الساحل العنابي، قمنا بأخذ عينات طيلة أربعة فصول السنة. ثم البحث عن 13 معدن باستعمال "الإشعاع الذري و ICP-OES". النتائج المتحصلة عليها أثبتت تلوث مياه و تربة الوادي. حسب المقاييس الفرنسية الحديثة، المياه جد ملوثة بالرصاص، و الزنك، و النحاس، و الكاديوم، و الكروم، مما جعلها غير صالحة للإستعمال. بينما تعاني التربة من تلوث بالكاديوم، و الأرسنيك، و الكروم، و الزنك، و الرصاص، لذلك فهي غير صالحة للحياة البيولوجية. أخيرا إستعمال الطريقة الرياضية لتحليل المعطيات، مكنتنا من إثبات المصدر السكاني و الزراعي و الصناعي لهذا التلوث.

الكلمات المفتاحية : الملوثات المعدنية الدقيقة - رمي النفايات العمرانية في البحر - المياه السطحية - رواسب - خليج عنابة

Résumé

Les écosystèmes aquatiques sont soumis à une importante pollution métallique suite aux rejets anthropiques. L'objet de cette étude est l'estimation des concentrations en éléments traces métalliques (ETM) de l'eau et du sédiment d'Oued Bouhamra, qui constitue l'une des principales sources anthropiques de pollution du Golfe d'Annaba. Les échantillons ont été prélevés en différentes saisons de l'année. Treize (13) ETM ont été dosés par spectrométrie de plasma à couplage inductif (ICP-OES) et fluorescence atomique. Les résultats obtenus montrent une importante contamination métallique de l'eau et du sédiment. Selon les normes françaises, en vigueur, l'eau est souillée respectivement par le Pb, le Zn, le Cu, le Cd et le Cr qui lui confèrent une très mauvaise qualité. Quand au sédiment, il est contaminé principalement par le Cd, l'As, le Cr, le Zn et le Pb qui lui attribuent une aptitude passable à la biologie. Enfin, l'analyse statistique en composantes principales (ACP), nous a permis d'identifier les origines industrielle, agricole et domestique de cette pollution.

Mots-clés : éléments traces métalliques- rejets urbains en mer – eau superficielle – sédiment - Golfe d'Annaba.

Abstract

Aquatic ecosystems are highly polluted with heavy metals arising from anthropogenic and terrigenous sources. The object of this study was to investigate the current status of metal pollution of water and sediment from Wadi Bouhamra which is a major antropic source of Annaba Gulf pollution. Samples were collected during the various seasons and 13 metallic trace elements (MTE) were analyzed by inductive coupled plasma optical emission spectrometer (ICP-OES) and atomic fluorescence.

The obtained results showed high metal contamination of water and sediment. According to French standards, water is altered respectively by Pb, Zn, Cu, Cd and Cr giving it a poor quality, whereas, sediment is mainly contaminated by Cd, As, Cr, Zn and Pb that assign it a passable ability to biology. Finally, the statistical principal component analysis (PCA) was used to identify the industrial, agricultural and domestic sources of this pollution.

Keywords : metallic trace elements - urban discharges in seawater - surface water – sediment – Gulf of Annaba.

* Auteur correspondant : khaledkhodja_soum@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

Située à l'Est du littoral algérien avec 85 km de côte, la ville d'Annaba est une baie ouverte à vocation industrielle, urbaine et touristique [1, 2]. De ce fait, elle subit une importante pression anthropique à l'origine de sérieux problèmes environnementaux dont les rejets d'eaux usées domestiques, industrielles et agricoles [3, 4, 5]. Tous ces effluents telluriques sont véhiculés par les oueds pour finir dans la baie d'Annaba. Faute de station d'épuration, ces rejets sont livrés à l'abandon et ne subissent aucun traitement, si ce n'est leur assemblage temporaire, limité à la saison estivale, dans les bassins de lagunage [6, 7]. Oued Bouhamra, dit encore Boudjemaâ, constitue l'une des sources majeures d'apports des eaux usées au Golfe d'Annaba. Il véhicule les eaux usées de plus de 100 000 habitants. Son débit varie à l'échelle de l'heure au grès de l'activité ménagère, de la population et des stations de relevage. Hormis les eaux pluviales, l'oued présente un débit fluctuant généralement dans la journée entre 0,5 et 3 m³.s⁻¹. Il s'agit en définitif d'un véritable émissaire d'eaux usées [6].

Ce travail s'insère dans une problématique plus vaste traitant du transfert de matières du continent au Golfe d'Annaba et les répercussions sur le système pélagique (plancton, chimisme, réseau trophiques, biologie et statistique des pêches). Ces apports terrigènes riches en sels nutritifs et en matières organiques, peuvent avoir des répercussions graves sur le proche littoral (hyperfertilisation et dystrophisation des eaux, altération des pêches, pertes économiques, risques pour la santé humaine, etc.). Effectivement, une étude

antérieure (2002-2004) des caractéristiques physico-chimiques et biochimiques de l'oued a montrée qu'il est eutrophe et pollué. Sachant que, ces flux telluriques sont potentiellement accompagnés de composés chimiques minéraux et organiques à caractère biocide, des analyses des éléments traces métalliques (ETM) et des résidus de pesticides dans l'eau et le sédiment de l'oued ont aussi été effectuées.

Cependant, dans la présente étude, nous n'allons exposer que les résultats relatifs aux ETM trouvés dans l'eau et le sédiment. Ces composés chimiques, de par leur utilisation massive, leur toxicité relativement élevée, leur caractère rémanent, et leur faculté de bioaccumulation dans les chaînes trophiques, sont au centre des préoccupations internationales relatives à la contamination de l'environnement [8, 9, 10, 11]. En plus, leur devenir et leur incidence sur l'écosystème aquatique en Algérie, et même à l'échelle internationale, ne sont pas bien connus actuellement, d'où le danger.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Site de l'étude (Fig. 1)

Long de 15 km, l'oued collecte les eaux usées de la plaine ouest de la ville. Avant d'aboutir au littoral, il reçoit les effluents de trois stations de relevage de nombreux raccordements d'eaux usées et des effluents mineurs du complexe Fertial (Asmidal) en plus des rejets de l'abattoir, distant de quelques mètres de celui-ci.

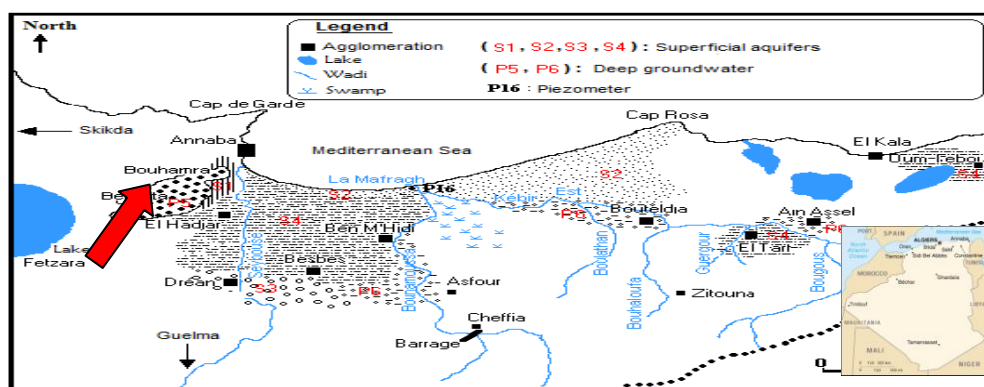


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

2.2. Echantillonnage et méthodes d'analyse

Afin, d'évaluer la qualité de l'eau et du sédiment de l'oued, un échantillonnage saisonnier a été réalisé durant l'année 2009–

2010 : une campagne en octobre 2009 (période automnale), une campagne en février 2010 (période hivernale), une campagne en mai 2010 (période printanière) et une campagne

en août 2010 (période estivale). Les échantillons d'eau et de sédiment ont été prélevés au niveau de l'interface (à environ 100 m de l'embouchure) où confluent tous les rejets terrigènes, avant de se jeter dans les eaux littorales. Les prélèvements ont été réalisés selon les guides d'échantillonnage préconisés par l'Agence de l'eau Loire Bretagne et le Cemagref [12, 13]. L'eau a été prélevée dans des flacons en polyéthylène et filtrée à travers une membrane filtrante de 0,45 µm de diamètre, préalablement lavée à l'acide nitrique à 1% et abondamment rincée à l'eau distillée. Le filtrat ainsi obtenu est immédiatement acidifié à l'acide nitrique concentré, à un pH < 2. Les sédiments superficiels (0-5 cm) sont prélevés par une écope en plastique et stockés dans des flacons en polyéthylène. Tous les échantillons ont été transportés, à l'obscurité dans une enceinte réfrigérée (4°C). Une fois arrivés au la boratoire LABOCEA (Bretagne Océane), les échantillons de sol sont congelés à - 20°C jusqu'à analyse.

Les ETM recherchés ont été analysés par ICP (spectrométrie de plasma à couplage inductif) de type ICP-OES, Vista-Pro, Varian, USA. L'arsenic a été dosé par fluorescence atomique, en utilisant un Excalibur 100 SS, PS Analytical Millenium System, UK. Les références prises pour l'évaluation de la qualité de l'eau (brute) et du sédiment sont :

- Le système français d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau (SEQ-Eau) préconisé par les agences

de l'eau (2003) pour les eaux brutes (version 2) [14].

- La circulaire du 7 mai 2007 DCE/23 définissant les "normes de qualité environnementales provisoires (NQE)" pour les eaux superficielles françaises [15].
- Les ETM trouvés ont été classés selon leur degré de toxicité (substances prioritaires dangereuses, substances prioritaires et substances pertinentes) figurant dans l'annexe X de la directive cadre de l'eau (DCE) et la liste II de la directive 76/464/ CEE.
- Enfin, pour le traitement des résultats nous avons utilisé l'ACP, qui est une méthode statistique multivariée de l'analyse des données, basée sur la corrélation entre les variables. Elle permet de décrire et de condenser le maximum d'information contenue dans un tableau de données quantitatives complexes. Elle fournit ainsi une représentation graphique se prêtant plus aisément à l'interprétation. Le logiciel utilisé est FactoMine R [16].

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Les ETM trouvés dans l'eau

Les résultats obtenus montrent que l'eau de l'oued renferme un grand nombre de micropolluants minéraux dont les concentrations sont relativement élevées (Tab. 1).

Tableau 1. Les ETM trouvés dans l'eau d'Oued Bouhamra

ETM	Concentrations en µg.L ⁻¹				SEQ- Eau (2003)	NQE (2009)
	octobre 2009	février 2010	mai 2010	août 2010		
Aluminium (Al)	252,00	150,00	3016,00	316,00	200	200
Arsenic (As)	13,20	10,40	14,80	12,60	10	4,2
Baryum (Ba)	46,00	34,00	74,20	44,80	700	58
Cadmium (Cd)	0,00	0,00	0,24	0,56	0,04	5
Chrome total (Cr)	0,00	0,26	11,34	1,26	1,8	3,4
Cuivre (Cu)	4,00	10,20	17,54	4,76	1	1,4
Fer total (Fe)	820,00	220,00	4920,00	616,00	-	200
Manganèse (Mn)	234,00	13,80	191,40	120,00	-	50
Nickel (Ni)	3,00	1,00	8,32	1,52	6,2	2,1
Plomb (Pb)	0,00	0,00	30,20	5,12	5,2	0,4
Sélénium (Se)	4,00	0,00	0,00	0,00	10	1
Etain (Sn)	0,00	0,00	0,00	0,00	10	1,5
Zinc (Zn)	76,00	75,00	99,80	60,60	4,3	7,8

ETM : éléments traces métalliques ; chiffre en gras : dépasse la norme ; - : pas de norme ; SEQ-Eau : système d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau préconisée par les

agences de l'eau (2003) [14] ; NQE : les normes de qualité environnementales provisoires pour les eaux superficielles [15].

Les ETM sont retrouvés dans l'eau durant les quatre campagnes d'échantillonnage. Les concentrations varient de 0 $\mu\text{g.L}^{-1}$ à 4920 $\mu\text{g.L}^{-1}$. Lors de la campagne d'octobre, 9 ETM ont été mis en évidence (Tab. 1). Leurs concentrations varient de 3 $\mu\text{g.L}^{-1}$ à 820 $\mu\text{g.L}^{-1}$. Sur les 9 ETM trouvés, 8 dépassent les limites préconisées. L'eau a une mauvaise qualité pour l'aptitude à la biologie par rapport au Zn [14] et présente un très mauvais potentiel biologique vis-à-vis aux Zn, Mn, et Fe [15]. 9 ETM ont été aussi trouvés, pendant la campagne de février, leurs concentrations se situent entre 0,26 $\mu\text{g.L}^{-1}$ et 220 $\mu\text{g.L}^{-1}$. 4 ETM sont supérieurs aux normes du SEQ-Eau et aux NQEp. Le Zn et le Cu confère à l'eau une mauvaise aptitude à la vie biologique. 11 ETM ont été trouvés lors de la campagne de mai. Les concentrations fluctuent

de 0,24 $\mu\text{g.L}^{-1}$ à 4920 $\mu\text{g.L}^{-1}$. Cette période a enregistré les concentrations les plus élevées. Les 11 ETM rencontrés excèdent les normes. L'Al, le Cu et le Zn confèrent à l'eau une aptitude très mauvaise à la biologie [14]. Le Pb et le Fe attribuent un très mauvais potentiel biologique à l'eau [15].

Lors de la campagne d'août, 11 ETM ont été rencontrés dans l'eau. Leurs concentrations fluctuent de 0,56 $\mu\text{g.L}^{-1}$ à 616 $\mu\text{g.L}^{-1}$. Sur les 11 ETM trouvés, 8 excèdent les limites de qualité retenues. L'eau de l'oued est d'aptitude mauvaise à la vie biologique par rapport au Cd et au Zn [14] et montre un très mauvais potentiel biologique vis-à-vis du Pb [15].

En se basant sur les concentrations des ETM, les plus déclassant, nous avons pu établir la qualité de l'eau, comme suit (Tab. 2):

Tableau 2. Qualité de l'eau de l'oued Bouhamra par rapport aux ETM

ETM	SEQ-Eau (2003)				NQEp (2009)			
	oct. 09	fév. 10	mai 10	août 10	Oct. 09	fév. 10	mai 10	août 10
Al	Pass.	Bonne	T. mauv.	Pass.	Mauv.	T. bonne	Mauv.	Mauv.
As	Pass.	Pass.	Pass.	Pass.	Mauv.	Mauv.	Mauv.	Mauv.
Ba	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	T. bonne	T. bonne	Mauv.	T. bonne
Cd	Abs.	Abs.	Pass.	Mauv.	Abs.	Abs.	T. bonne	T. bonne
Cr total	Abs.	Bonne	Pass.	Bonne	Abs.	T. bonne	Mauv.	T. bonne
Cu	Pass.	Mauv.	T. mauv.	Pass.	Mauv.	Mauv.	Mauv.	Mauv.
Fe total	-	-	-	-	Mauv.	Mauv.	Mauv.	Mauv.
Mn	-	-	-	-	Mauv.	T. bonne	Mauv.	Mauv.
Ni	Bonne	Bonne	Pass.	Bonne	Mauv.	T. bonne	Mauv.	T. bonne
Pb	Abs.	Abs.	Pass.	Pass.	Abs.	Abs.	Mauv.	Mauv.
Se	Bonne	Abs.	Abs.	Abs.	Mauv.	Abs.	Abs.	Abs.
Zn	Mauv.	Mauv.	T. mauv.	Mauv.	Mauv.	Mauv.	Mauv.	Mauv.

Abs. : absent ; - : pas de normes. Le code couleur pour le SEQ-Eau est : rouge = Très mauvaise (T. mauv.) ; orange = Mauvaise (Mauv.), jaune = Passable (Pass.) ; vert = Bonne ; bleu = Très bonne (T. bonne) ; Le code couleur pour les NQEp est : rouge = Mauvaise (Mauv.) ; bleu = Très bonne (T. bonne) ;

L'eau présente une très mauvaise aptitude à la vie biologique. Une pollution métallique importante y est mise en relief. D'après le SEQ-Eau, nous constatons qu'elle est prioritairement contaminée par : le Zn > Cu >

Al > Cd > As > Pb > Cr > Ni. D'après les NQEp, l'eau est principalement polluée par : Fe > Zn > Cu > As > Al > Mn > Pb > Ni > Se > Cr > Ba, et présente un très mauvais potentiel biologique.

En outre, il est important de souligner que la plupart des ETM trouvés présentent un degré de toxicité relativement élevé et figurent dans l'annexe X, de la DCE et la liste II de la directive 76/464/ CEE. Le tableau 3 résume la comparaison des teneurs des trois catégories d'ETM trouvés aux limites préconisées par le SEQ-Eau et les NQEp.

Tableau 3. Comparaison des teneurs en ETM toxiques, trouvés dans l'eau avec les normes du SEQ-Eau et les NQEp.

Substances \ Normes	SEQ-Eau	NQEp
<u>Substances prioritaires dangereuses</u> Cadmium (Cd)	14 fois supérieure	Dans la norme
<u>Substances prioritaires</u> Nickel (Ni) Plomb (Pb)	1 fois supérieure 6 fois supérieure	4 fois supérieure 76 fois supérieure
<u>Substances pertinentes</u> Arsenic (As) Baryum (Ba) Chrome (Cr) Cuivre (Cu) Sélénium (Se) Zinc (Zn)	1 fois supérieure Dans la norme 6 fois supérieures 17 fois supérieure Dans la norme 23 fois supérieure	3 fois supérieure 1 fois supérieure 3 fois supérieures 13 fois supérieure 4 fois supérieure 13 fois supérieure

D'après le tableau 3, nous constatons que les ETM responsables de cet état de dégradation avancée de la qualité de l'eau sont respectivement, le Pb > le Zn > le Cu > le Cd > le Cr > le Ni > le Se > l'As > le Ba. Ces derniers peuvent avoir des origines multiples. Néanmoins, nous pouvons dire à priori, qu'ils sont issus des diverses activités anthropiques :

Le plomb : il est si répandu et si utilisé dans l'industrie, que les possibilités de pollution sont extrêmement nombreuses et variées [15]. Cependant, vu que l'oued est situé sous un pont où le trafic routier est relativement intense, nous pouvons avancer à priori, que ces teneurs élevées en Pb peuvent être issues de l'emploi du plomb tétraéthyl dans les carburants et l'utilisation des combustibles fossiles. Ce qui entraîne la formation d'aérosols plombifères, qui constituent de nos jours, la principale source de plomb dans les hydrosystèmes [15, 17]. Il peut provenir également, des déchets industriels banals émanant des diverses industries présentes, et principalement les rejets du complexe de fabrication des engrais phosphatés et des produits phytosanitaires (Fertial), situé à quelques mètres de l'oued.

Le zinc : la pollution des hydrosystèmes par le Zn provient de plusieurs sources industrielles [15, 18, 19]. Cependant, elle peut provenir aussi, des sources domestiques et agricoles [17, 18]. Effectivement, l'existence de différentes zones industrielles dans le site d'étude peut expliquer les concentrations élevées en Zn. Néanmoins, il nous semble que le complexe d'Asmidal, situé à quelque mètres de l'embouchure de l'oued, a un impact direct. Les pratiques culturales concourent également, à

l'enrichissement de l'eau en cet élément suite à l'utilisation des pesticides (zinèbe) et des engrais phosphatés. Sachant, que le site n'est pas très distant du port d'Annaba, les teneurs élevées en Zn peuvent aussi être attribuées à la dissolution des anodes sacrificielles, utilisées pour la protection cathodique des coques des navires [20, 21].

Le cuivre : il est largement utilisé en industrie chimique pour la fabrication des produits phytosanitaires (insecticides, fongicides, algicides). Il semble que ces concentrations relativement élevées proviennent des eaux résiduelles rejetées par le complexe Fertial dans l'oued. Une seconde origine éventuelle du Cu est l'agriculture où les sels de cuivre sont largement utilisés [15, 17, 19].

Le cadmium : il est presque toujours associé à des minerais de Zn ou de Pb. D'une façon générale, les eaux ne contiennent que quelques microgrammes de cadmium par litre. Lorsque des teneurs plus élevées sont rencontrées dans les eaux superficielles, l'origine du Cd doit être recherchée dans les effluents industriels (galvanoplastie, en particulier) et agricoles. Il est très utilisé dans diverses industries dont l'industrie de fabrication des engrais phosphatés [17, 22] ; ce qui est la principale vocation du complexe d'Asmidal.

Le Chrome : il est généralement peu présent dans l'eau, sa présence est le plus souvent liée aux rejets des ateliers de galvanoplastie. Ce métal est principalement utilisé pour le chromage, la fabrication d'alliages, d'agents oxydants, d'inhibiteurs de la corrosion (par ajout de certains de ses composés à l'eau

industrielle de refroidissement comme élément anticorrosion) [15, 17]. Ceci suggère que l'origine du Cr trouvé dans l'oued, peut provenir des eaux de refroidissement de Fertial, qui sont déversées directement dans la baie d'Annaba.

Le nickel : sa présence dans l'eau est liée principalement aux activités anthropiques [17, 19]. Il est très employé dans l'industrie chimique comme catalyseur [15] et entre dans la composition de divers fongicides [19]. Ce qui nous laisse supposer que son origine probable est les effluents de Fertial.

Le Selenium : il entre dans la fabrication de nombreux produits phytosanitaires [15, 19]. Ce qui nous permet de supposer que la source la plus probable de cet élément est le rejet des eaux résiduaires par le complexe Fertial. Une seconde source peut être également envisagée, qui est l'activité culturale. La grande fertilité des terres de la plaine basse de la Seybouse, qui se trouve à proximité d'Oued Bouhamra, permet une agriculture importante et diversifiée qui s'étend sur les rives d'Oued Seybouse. L'utilisation des produits phytosanitaires (les fongicides, les insecticides, les acaricides, etc.)

et le lessivage des sols, peuvent être à l'origine de la présence du Se dans l'eau.

L'arsenic : de fortes teneurs en As dans l'eau superficielle peuvent être attribuées aux effluents agricoles et industriels. L'arsenic est utilisé, entre autre, dans l'industrie chimique pour la fabrication des engrais phosphatés où il peut se rencontrer à raison de plusieurs ppm, d'herbicides arséniés (cacodylates), d'insecticides et de détergents [15, 19, 23, 24]. Ceci suggère que l'origine probable de cet élément est le rejet des eaux résiduaires de Fertial, en plus des eaux de lessivage des terres agricoles.

Le baryum : il ne peut exister naturellement dans l'eau que sous forme de carbonate [15, 19]. Sa présence dans l'eau peut occasionner une pollution diffuse car il est utilisé comme adjuvant dans les insecticides [17, 18].

3. 2. Les ETM trouvés dans le sédiment

Les ETM sont présents dans le sédiment de l'oued durant toutes les campagnes. Leurs teneurs fluctuent entre 0,44 mg.kg⁻¹ et 61056.52 mg.kg⁻¹ (Tab. 4).

Tableau 4. Les ETM trouvés dans le sédiment d'Oued Bouhamra

ETM	Concentrations en mg.kg ⁻¹				SEQ-Eau (2003)
	octobre 2009	février 2010	mai 2010	août 2010	
Aluminium (Al)	52238,36*	34324,49*	12619,76*	61056,52*	-
Arsenic (As)	11,36	19,53	23,87	19,65	9,8
Cadmium (Cd)	0,44	0,50	0,56	2,59	1
Chrome total (Cr)	44,22	43,32	22,01	104,40	43
Cuivre (Cu)	26,00	25,44	5,76	35,97	31
Fer total (Fe)	24094,00*	26997,49*	15710,92*	33717,93*	-
Manganèse (Mn)	254,87*	403,68*	310,45*	360,91*	-
Nickel (Ni)	20,16	18,21	11,11	26,72	22
Plomb (Pb)	38,71	28,65	16,62	45,20	35
Zinc (Zn)	90,08	84,51	45,47	185,96	120

D'après le tableau 4, nous constatons que l'Al, le Fe et le Mn présentent des concentrations relativement élevées, cependant, nous ne pouvons rien dire sur la qualité de l'eau vis-à-vis de ces éléments, faute de normes. Sur les 7 ETM restants, nous pouvons avancer qu'au cours de la campagne d'octobre, 3 dépassent les limites préconisées par le SEQ-Eau et attribuent au sédiment une aptitude passable à la biologie.

Pendant la campagne de février, les concentrations en As et en Cr confèrent au sédiment une aptitude passable à la vie biologique, selon le SEQ-Eau.

Au cours de la campagne de mai, nous remarquons que l'As excède les limites fixées par le SEQ-Eau. Le sédiment présente une aptitude passable à la biologie.

La campagne d’août a enregistré les teneurs les plus élevées. 7 ETM excèdent les normes du SEQ–Eau. Le sédiment est d’aptitude passable à la vie biologique. En se basant sur les

concentrations des ETM les plus pénalisants, nous avons pu classer le sédiment, comme suit (Tab. 5) :

Tableau 5. Qualité du sédiment d’Oued Bouhamra par rapport aux ETM

ETM	SEQ-Eau (2003)			
	octobre 2009	février 2010	mai 2010	août 2010
Aluminium (Al)	-	-	-	-
Arsenic (As)	Passable	Passable	Passable	Passable
Cadmium (Cd)	Bonne	Bonne	Bonne	Passable
Chrome total (Cr)	Passable	Passable	Bonne	Passable
Cuivre (Cu)	Bonne	Bonne	Bonne	Passable
Fer total (Fe)	-	-	-	-
Manganèse (Mn)	-	-	-	-
Nickel (Ni)	Bonne	Bonne	Bonne	Passable
Plomb (Pb)	Passable	Bonne	Bonne	Passable
Zinc (Zn)	Bonne	Bonne	Bonne	Passable

- : pas de normes.

Le tableau 5 montre que le sédiment est sujet à une contamination métallique relativement importante. Il est dégradé principalement par l’As > le Cr > le Pb > le Cd > le Zn > le Cu > le Ni. Il présente une qualité passable pour l’aptitude à la biologie.

Enfin, nous soulignons que la plupart des ETM présents, figurent dans l’annexe X de la DCE et la liste II de la directive 76/464/ CEE. La comparaison des teneurs en ETM toxiques aux limites de qualité, est présentée dans le tableau 6.

Tableau 6. Comparaison des teneurs en ETM toxiques, trouvés dans le sédiment d’Oued Bouhamra, avec les limites fixées par le SEQ–Eau.

Substances	Norme	SEQ-Eau
<u>Substances prioritaires dangereuses</u> Cadmium (Cd)		3 fois supérieure
<u>Substances prioritaires</u> Nickel (Ni) Plomb (Pb)		1 fois supérieure 1 fois supérieure
<u>Substances pertinentes</u> Arsenic (As) Chrome (Cr) Cuivre (Cu) Zinc (Zn)		2 fois supérieure 2 fois supérieure 1 fois supérieure 2 fois supérieure

D’après le tableau 6, nous constatons que le sédiment est altéré, dans un ordre décroissant, par : Cd > As > Cr > Zn > Pb > Ni > Cu. Les origines de ces éléments chimiques sont probablement les différents effluents industriels, agricoles et domestiques, qui ont été explicités antérieurement.

3. 3. Analyse en composante principale (ACP)

L’analyse en composante principale des données analytiques de l’eau et du sédiment

nous a permis d’établir la typologie de la contamination d’Oued Bouhamra.

3. 3. 1. Analyse du graphe de l’ACP de l’eau

Sur le plan factoriel F₁X F₂ de l’ACP, apparait un gradient, révélateur d’un effet GUTTMAN [25], signifiant qu’un des axes de l’analyse, en l’occurrence l’axe 1, résume l’essentiel de l’information contenue dans le plan factoriel (Fig. 2).

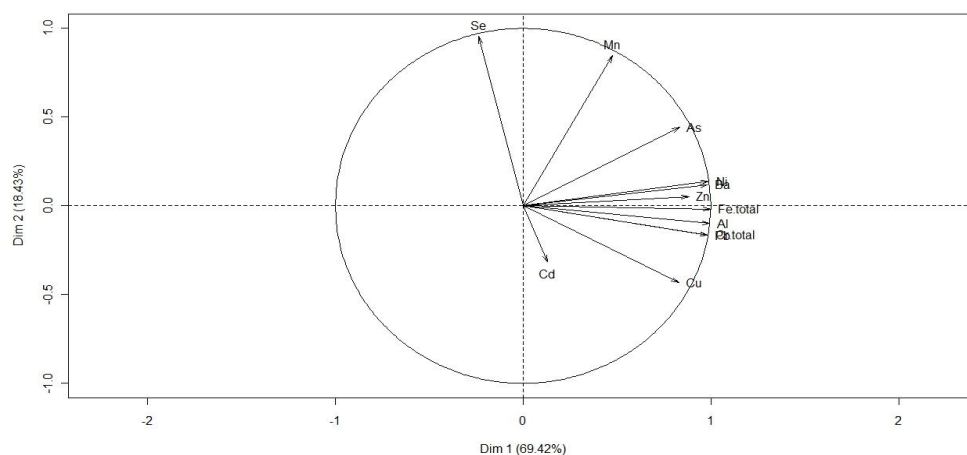


Figure 2. Cercle de corrélation des variables avec les axes 1 X 2 de l'ACP

Les taux d'inertie sont en effet de : 69,42 % pour F_1 , 18,43 % pour F_2 et 12,15 % pour F_3

(Tab. 7). Toute l'information est donc contenue dans les trois premiers axes.

Tableau 7. Taux d'inertie et valeurs propres des trois premiers axes (eau)

Axes	Valeurs propres	Pourcentage d'inertie	Pourcentage d'inertie cumulée
F_1 (Dim 1)	8,33	69,42	69,42
F_2 (Dim 2)	2,21	18,43	87,85
F_3 (Dim 3)	1,45	12,15	100

Les ETM qui contribuent le plus à la construction de l'axe 1 (F_1) sont, par ordre décroissant d'importance : le Fe > l'A > le Ni > le Cr > le Ba > le Pb > le Zn > l'As > le Cu (Fig. 2). Ces éléments chimiques évoluent dans le même sens positif, par rapport à l'axe 1, ce qui peut refléter leur origine commune. En effet, tous ces ETM sont issus principalement des activités industrielles (industrie chimique, métallurgie, galvanoplastie, sidérurgie, trafic routier, etc.). L'axe 1 met donc en relief les effluents industriels qui sont à l'origine de la contamination de l'eau d'Oued Bouhamra.

Le Se et le Mn contribuent le plus, à la formation de l'axe 2 (F_2) et évoluent dans le même sens positif (Fig. 2). Ce qui reflète la source commune de ces éléments, qui proviennent essentiellement des activités agricoles. Effectivement, le Se entre dans la fabrication de nombreux produits

phytosanitaires. Le Mn est un oligo-élément, très important, pour de nombreuses plantes (légumes, agrumes...), il fait donc partie de la composition des fertilisants et il est utilisé, en plus, pour l'alimentation des animaux [26]. L'axe 2 semble donc, mettre en évidence les effluents agricoles.

Sur la carte factorielle du plan $F_1 \times F_2$ de l'ACP (Fig. 3), nous observons l'association, par rapport à l'axe 1, des effluents industriels à la période printanière (3). Ce qui peut traduire des rejets relativement élevés suite à une activité industrielle importante, durant cette saison. Cependant, les effluents agricoles sont associés à la période automnale (1), selon l'axe 2. Ce qui reflète les différentes pratiques culturales qui se font en cette période (labour des champs, ensemencement, épandage d'engrais et de produits phytosanitaires...) et sont probablement à l'origine de ces rejets.

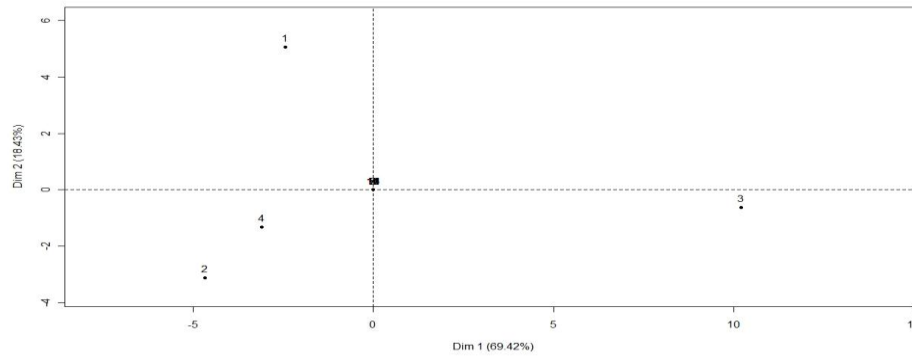


Figure 3. Carte factorielle des saisons (axes 1 X 2 de l'ACP)
 (1 : saison automnale, 2 : saison hivernale, 3 : saison printanière, 4 : saison estivale)

Sur le plan $F_1 \times F_3$ de l'ACP, nous remarquons que le Cd contribue fortement à l'édification de

l'axe 3 (Fig. 4) et se distingue des autres effluents industriels.

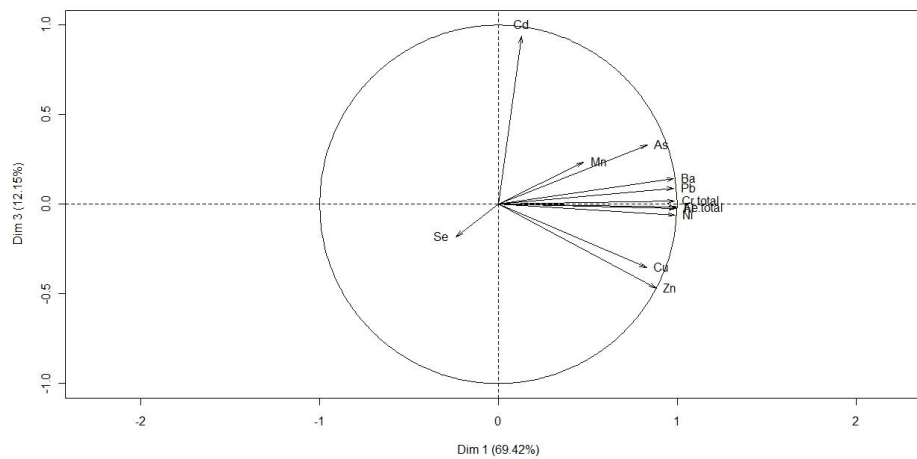


Figure 4. Cercle de corrélation des variables avec les axes 1 X 3 de l'ACP

En effet, malgré son origine, essentiellement industrielle, le Cd a enregistré les concentrations les plus faibles dans l'eau. Contrairement à de nombreux ETM (Cu, Zn, Fe, Mn...), le Cd n'a aucun rôle métabolique connu et ne semble pas biologiquement essentiel ou bénéfique au métabolisme des êtres vivants. Cependant, il se range parmi les ETM les plus toxiques pour les organismes [17, 27,

28, 29]. L'axe 3 semble mettre en relief le degré de toxicité élevé du Cd même à de faibles teneurs.

L'analyse de la carte factorielle du plan $F_1 \times F_3$ de l'ACP (Fig. 5), montre l'association du Cd à la période estivale (4), par rapport à l'axe 3. En effet, les taux les plus élevés en cet élément, ont été trouvés au cours de cette période.

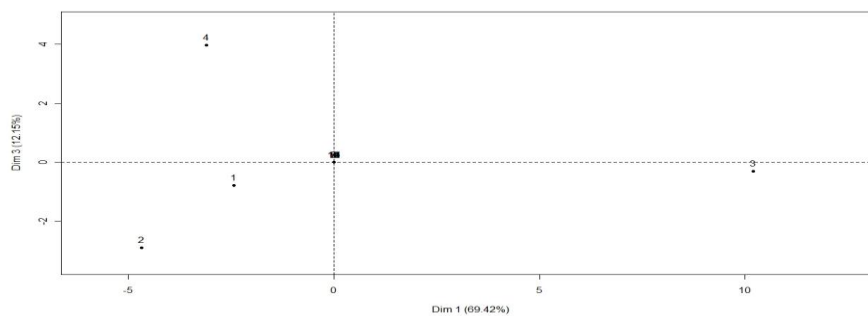


Figure 5. Carte factorielle des saisons (axes 1 X 3 de l'ACP)
 (1 : saison automnale, 2 : saison hivernale, 3 : saison printanière, 4 : saison estivale)

3. 3. 2. Analyse du graphe de l'ACP du sédiment

L'ACP des données analytiques du sédiment, nous a permis d'établir la typologie de la contamination du sédiment de l'oued. Les

valeurs propres des trois composantes principales (F₁, F₂, F₃) de l'analyse multi variable et leurs contributions à l'inertie totale sont présentées dans le tableau 8.

Tableau 8. Taux d'inertie et valeurs propres des trois premiers axes (sédiment)

Axes	Valeurs propres	Pourcentage d'inertie	Pourcentage d'inertie cumulée
F ₁ (Dim 1)	7,35	73,52	73,52
F ₂ (Dim 2)	1,97	19,72	93,24
F ₃ (Dim 3)	0,67	6,76	100

D'après le Tableau 8, nous constatons que plus de 90 % de l'information est contenue dans les deux premiers axes de l'analyse. Les taux d'inertie sont en effet de : 73,52 % pour F₁,

19,72 % pour F₂. C'est pourquoi, Seul le plan factoriel (F₁ X F₂) de l'ACP est pris en compte pour décrire les corrélations des variables et des individus avec les axes (Fig. 6).

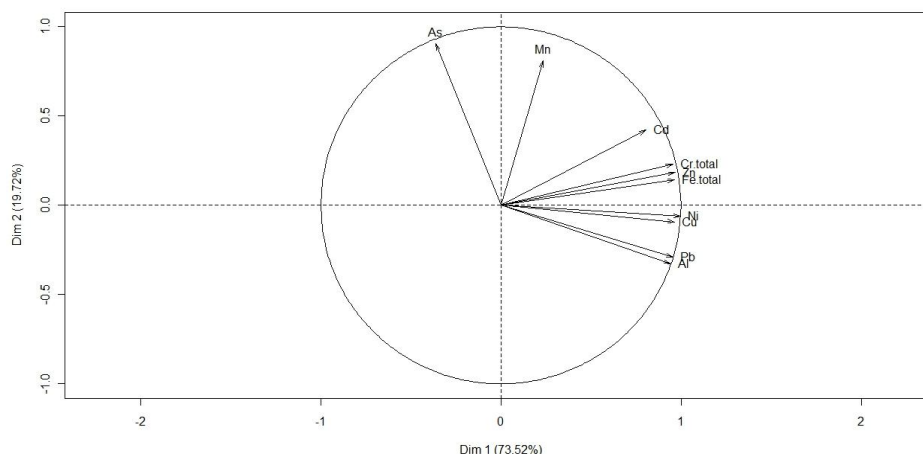


Figure 6. Cercle de corrélation des variables avec les axes 1 X 2 de l'ACP

Les éléments traces métalliques les plus corrélés à l'axe 1, qui contribuent de manière significative à sa formation sont respectivement : le Ni > le Zn > le Cu > le Fe > le Pb > le Cr > l'Al > le Cd (Fig. 6). Ces derniers évoluent dans le même sens positif, ce qui peut traduire leur origine commune. En effet, la plupart de ces polluants proviennent des activités industrielles dont la galvanoplastie, l'industrie chimique, la métallurgie, la sidérurgie, le trafic routier, etc. l'axe 1 semble donc, mettre en relief les effluents industriels à l'origine de la contamination métallique du sédiment.

Les ETM qui contribuent le plus à l'édification de l'axe 2 sont respectivement l'As et le Mn (Fig. 6). Ces derniers évoluent dans le même

sens positif, ce qui peut refléter leur origine commune. Ces éléments chimiques sont très employés en agriculture : l'As est utilisé pour la fabrication des produits phytosanitaires et des engrais phosphatés. Quand au Mn, il est utilisé pour l'alimentation du bétail et comme engrais dans la culture des légumes et des agrumes. L'axe 2 semble donc, mettre en relief les effluents agricoles.

À cette typologie de variables (ETM) correspond une typologie de relevés (saisons).

L'analyse de la carte factorielle (Fig. 7) montre que les effluents industriels sont associés à la saison (4) et s'opposent à la saison (3) par rapport à l'axe 1

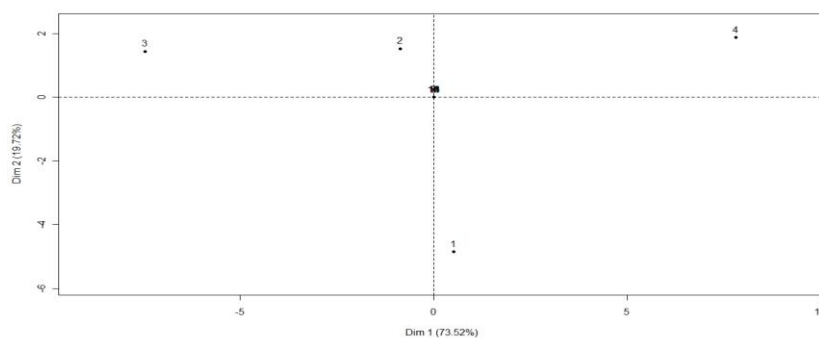


Figure 7. Carte factorielle des saisons (axes 1 X 2 de l'ACP)

(1 : saison automnale, 2 : saison hivernale, 3 : saison printanière, 4 : saison estivale)

Cette disjonction entre les saisons peut être expliquée comme suit : lors de la période estivale (période d'étiage), les teneurs en ETM sont plus élevées suite aux températures élevées et à l'absence de précipitations. Cependant la saison printanière se traduit par un apport d'eau à l'origine de la mise en solution des éléments chimiques d'où des concentrations moindres.

L'association de l'As et le Mn à la saison hivernale (2) et leur opposition à la saison automnale (1) par rapport à l'axe 2 (Fig. 7) met bien en évidence le lessivage des terres agricoles, durant la période des hautes eaux, favorisant l'infiltration des produits chimiques dans le sol. Cependant, la saison automnale (1) ne contribue pas réellement à l'enrichissement du sédiment en ces éléments suite à un faible apport en précipitations.

4. CONCLUSION

En Algérie, les cours d'eau constituent les premiers récepteurs des divers rejets anthropiques qui sont déversés sans prétraitements. Oued Bouhamra représente une des principales sources qui contribuent de manière importante à la pollution des eaux du Golfe d'Annaba. Les résultats de l'analyse de l'eau et du sédiment révèlent des concentrations relativement élevées en ETM qui dépassent, pour certains, les limites préconisées par le SEQ-Eau et les NQEp. L'eau est de mauvaise qualité et le sédiment présente une aptitude passable à la biologie. En outre, la plupart des ETM trouvés (Cd, Ni, Pb, As, Cu, Cr, Zn) sont présents dans l'annexe X de la DCE et la liste II de la directive 76/464/CEE, qui définissent les substances dangereuses pour les écosystèmes aquatiques. Enfin, l'ACP nous a permis de montrer les origines industriels et agricoles des ETM.

Remerciements

Les auteurs remercient vivement Mme Rouibah Karima et Mr. Rouibah Ammar pour leur aide précieuse.

REFERENCES

- [1] Ouali N., Derradji F., Bouhedja Y. & Kasdarli C., 2008. Pollution du sédiment superficiel par neuf métaux traces : cas de la baie d'Annaba (Algérie - Méditerranée Sud-Occidentale), *Physical and Chemical News*, Vol. 42, 139-143.
- [2] Sifi K., Chouahda S. & Soltani N., 2007. Biosurveillance de l'environnement par la mesure de biomarqueur chez *Donax trunculus* (L., 1758) dans le golfe d'Annaba, Algérie, *Mésogée*, Vol. 63, 11-18.
- [3] Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement., 2002. Plan national d'actions pour l'environnement et le développement durable (PNAE-DD). Ed. MATE. 118p.
- [4] Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement., 2003. Rapport sur l'état et l'avenir de l'environnement. Ed. ONEDD. 463p.
- [5] Office National d'Assainissement., 2000. Rapport sur l'état et l'avenir de l'environnement. Ed. MATE. 118p.
- [6] Khammar H., Ounissi M., Saker I., Ziouch O.M. & Haridi A., 2009. Caractères chimiques des effluents urbains introduits au littoral d'Annaba (Nord Est Algérie), Actes du séminaire national sur l'eau et l'environnement, Chlef, Algérie, 127-135.
- [7] Kherraz K., 2008. Protection des eaux du bassin de la Seybouse contre la pollution, Atelier sur la protection des eaux du bassin de la Seybouse contre la pollution, Annaba, Algérie, 1-27.
- [8] Levet D., Lehen A., Jacques S., Mouchelin J. & Berly A., 2008. Guide pratique des substances toxiques dans les eaux douces et littorales du bassin Seine-Normandie. Ed. Aquascop. 31p.
- [9] Tessier E., 2012. Diagnostic de la contamination sédimentaire par les métaux/métalloïdes dans la rade de Toulon et mécanismes contrôlant leur mobilité. Thèse de Doctorat en Chimie de l'Environnement, Université du Sud Toulon Var, France. 291p.
- [10] Pourang N. & Noori A. S., 2014. Heavy metals contamination in soil, surface water and ground water of an agricultural area adjacent to Tehran oil refinery, Iran,

International Journal Environmental Research, Vol. 8 (4), 871-886.

[11] Guillaud J-F. & Romana L-A., 1990. La mer et les rejets urbains. Ed. Ifremer. 237p.

[12] Agence de l'eau Loire-Bretagne., 2006. Le prélèvement d'échantillons en rivière, Techniques d'échantillonnage en vue d'analyses physico-chimiques. Ed. Guide Technique. 134p.

[13] Schiavone S. & Coquery M., 2011. Guide d'échantillonnage et de prétraitement des sédiments en milieu continental pour les analyses physico-chimiques de la DCE. Ed. Cemagref. 24p.

[14] Agences françaises de l'Eau., 2003. Système d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau (SEQ-Eau), Grilles d'évaluation, version 2. Ed. Agence de l'eau. 40p.

[15] Rodier J., Legube B. & Merlet N., 2009. L'analyse de l'eau. Ed. Dunod. 1526p.

[16] Husson F., Lê S. & Pagès J., 2009. Analyse de données avec R. Pratique de la statistique. Ed. Presse Universitaire de Rennes. 224p.

[17] Gaujous D., 1995. La pollution des milieux aquatiques. Ed. Technique & Documentation. 200p.

[18] Ramade F., 1998. Dictionnaire encyclopédique des sciences de l'eau. Ed. Science. 786p.

[19] Savary P., 2003. Guide des analyses de la qualité de l'eau. Ed. Dossier d'Expert/Techni.Cités. 283p.

[20] Bird P., Comber S.D.W., Gardner M.J. & Ravenscroft J.E., 1996. Zinc inputs to coastal waters from sacrificial anodes, Science total Environment, Vol. 181, 257-264.

[21] Rouibah K., Mezaouda R., Meniai A.H., Touil B., Ghedrouche S. & Hamze M., 2010. Évaluation de la contamination des eaux portuaires de la région de jijel par les métaux lourds, Proceeding WATMED 5, Lille, France, 13-26.

[22] Le Goff F. & Bonnomet V., 2004. Devenir et comportement des métaux dans l'eau : biodisponibilité et modèles BLM. Ed. INERIS. 87p.

[23] Bicocchi S., 1998. Les polluants et les techniques d'épuration des fumées (cas des unités de destruction thermique des déchets). Ed. TEC & DOC. 184p.

[24] Ramade F., 2008. Dictionnaire encyclopédique des sciences de la nature et de la biodiversité. Ed. Dunod. 726p.

[25] Dervin C., 1988. Comment interpréter les résultats d'une analyse factorielle des correspondances. Ed. STAT-ITCF. 52p.

[26] Société de fertilisants d'Algérie Fertial SPA., 2010. Utilisation des engrais, grandes cultures, arboriculture, cultures maraîchères et industrielles. Ed. Fertial. 100p.

[27] Damy P-C., 2011. Synthèse des connaissances sur l'origine et la disponibilité du cadmium dans les eaux continentales. Ed. AgroParisTech. 39p.

[28] Chiffolleau J.-F., Gonzalez J.-L., Miramand P. & Thouvenin B., 1999. Le cadmium, comportement d'un contaminant métallique en estuaire. Ed. Ifremer. 30p.

[29] Martin-Garin A. & Simon O., 2004. Cadmium 109 et environnement. Ed. IRSN. 14p.