



Evaluation spatiotemporelle de la contamination métallique des ressources hydriques superficielles de la basse Moulouya

Evaluation spatiotemporal of the metal contamination of surface water resources in the lower Moulouya (North eastern Morocco)

Aouatif Fahssi^{1*}, Hameed Saleh Ali Yahya¹, Rachid Touzani^{2,3}, Abdelhafid Chafi¹

¹Laboratoire des Sciences de l'Eau, d'Environnement et Ecologie, Département de Biologie, Faculté des Sciences, Université Mohammed Ier, code postal 60000 Oujda- Maroc

²Laboratory of Applied Chemistry & Environment, Faculty of Science, Mohammed Premier University - B.P. 4808, 60046 Oujda - Morocco.

³Laboratoire de Chimie Appliquée et Environnement (LCAE-URAC18) Faculté Pluridisciplinaire Nador ; BP300 Selouane, 62700 Nador-Maroc

Received 20 Mar 2016, Revised 12 May 2016, Accepted 16 May 2016

*For correspondence: E-mail: a_fahssi@yahoo.fr , Tel: +212677252636

Abstract

The Moulouya basin presents a socioeconomic importance for Morocco in general and particularly in the Eastern region. The Moulouya, one of the main rivers of Morocco, through several cities in particular: Missouri, Outat El Haj, Tindit, Guercif, and finally leading to the Mediterranean. Since several years, a significant deterioration in the quality of its waters, generated by different releases of pollutant emitted into the river without treatment. These releases result from different domestic, industrial and agricultural activities that know this basin. Therefore, the lower Moulouya site of our study is threatened by pollution and has a good site for accumulation and storage of metal pollutants. To evaluate the spatiotemporal evolution of the metal contamination of the lower Moulouya, water and sediment samples were collected along the lower Moulouya and tributaries, as ten stations (S1 to S10), the samples were analyzed for heavy metals: Iron (Fe), Lead (Pb), Zinc(Zn) and Cadmium (Cd), (City of Taourirt). The results of analysis by ICP-AES, given to reliefs pollution degree by these toxic metals, as iron is the most abundant element in the waters and sediments of the Lower Moulouya. Lead and zinc have moderate to large values , while all of the samples contains relatively low levels of cadmium. Analyses have shown also that the highest values of the studied heavy metals are recorded at the levels of neighboring resorts of human activities and industrial and agricultural units, subject to the contribution of polluted waters.

Keywords: Heavy metals, low Moulouya, spatiotemporal evolution, ICP-AES

Résumé

Le bassin de la Moulouya présente une importance socio-économique pour le Maroc en général et la région de l'orientale en particulier. L'oued Moulouya, l'une des principales rivières du Maroc, traversant plusieurs villes en particulier les villes de Missouri, Outat El Haj, Tindit, Guercif et enfin débouchant sur la méditerranée. Depuis plusieurs années, une dégradation notable de la qualité de ses eaux, engendrées par différents rejets de polluant émis sans traitement dans la rivière. Ces rejets résultent de différentes activités domestiques, industrielles et agricoles que connaît ce bassin. De ce fait, la basse Moulouya, site de notre étude, est très menacée par la pollution, et présente un site propice d'accumulation et de stockage des métaux polluants. Pour évaluer l'évolution spatiotemporelle de la contamination métallique de la basse Moulouya, des échantillons d'eau et de sédiments ont été prélevés le long de la basse Moulouya et ces affluents, selon dix stations (S1 à S10), ces échantillons ont fait l'objet d'une analyse des métaux lourds : Fer (Fe), Plomb (Pb), Zinc (Zn) et Cadmium (Cd). Les résultats d'analyse par ICP-AES, ont permis de mettre en reliefs un degré de pollution par ces métaux toxiques, étant donné que le fer est l'élément le plus abondant dans les eaux et les sédiments de la basse Moulouya, Le Plomb et le zinc présentent des valeurs modérées à importantes, alors que l'ensemble des échantillons contient des teneurs relativement faibles en cadmium. Les analyses ont montrés également que les valeurs les plus élevées des métaux lourds étudiés, sont enregistrée aux niveaux des stations avoisinantes des activités anthropiques et des unités industrielles et agricoles, soumises aux apports des eaux polluées (la ville de Taourirt), cependant, Oued Tizeghrane en relation directe avec Oued Za présente une forte pollution par les eaux usées, ajoutant à cela la possibilité du lessivage des sols riches en fertilisants et qui peut enrichir l'eau par ces polluants.

Mots clés : métaux lourds, basse Moulouya, évolution spatiotemporelle, ICP-AES.

1. Introduction

L'eau est une ressource naturelle à la base de la vie et une denrée essentielle à la majeure partie des activités économiques de l'homme. Elle est également rare et constitue en fait une ressource dont la disponibilité est marquée par une irrégularité prononcée dans le temps et dans l'espace.

L'écosystème aquatique est de plus en plus menacé par différentes sources de pollution qui risquent de diminuer ses potentialités économiques et d'avoir des répercussions néfastes sur la santé humaine.

Dans l'Afrique du Nord, le Maroc s'individualise sur le plan hydrologique par son réseau fluvial très dense, parmi lequel figurent les rivières les plus longues de la région : Moulouya, Sebou, Oum Er-Rbi'a, Tansift, Dr'a ... La Moulouya est pratiquement la plus longue de celles-ci.

L'Oued Moulouya draine dans sa partie amont des districts miniers abandonnés de Aouli, de Zaida et de Mibladen avant de se jeter dans la méditerranée [1], en outre la région de la haute Moulouya constitue le plus gros district du royaume du Maroc, Mais, après sa fermeture en 1986, ce district a été abandonné avec leurs installations minières et métallurgiques, laissant en surface des matériaux des déchets miniers, des rejets de laverie et des résidus métallurgiques qui peuvent être une source importante de contamination de l'écosystème aquatique. [2].

Ce réseau hydrographique dont les apports moyens s'élèvent à un milliard de m³/an [3], est sujet alors à d'importants risques de pollution qui menacent la qualité des eaux en compromettant les divers usages de l'eau.

La basse Moulouya, site de notre étude, est très menacé par la pollution d'origine agricole, vu qu'elle limite de l'Ouest la plaine de Triffa, l'une des grandes régions du Maroc qui connaît une intensification agricole, ajoute à cela les rejets liquides d'origine domestiques et industrielles générés par les villes de Missour, Outat El Haj, Tindit, Guercif et Taourirt, qui sont déversées directement dans cet Oued d'une façon précaire et sans traitement préalable [2].

Parmi les substances polluantes, les métaux lourds sont les plus redoutés du fait qu'ils sont non biodégradables et le phénomène d'autoépuration s'avère généralement incapable de résoudre ce phénomène [4], certains métaux lourds sont biologiquement nécessaires à l'état de trace et jouent un rôle important dans la vie humaine [5-6], tandis que d'autres n'ont aucune fonction biologique, Mais en excès, tous peuvent présenter des risques pour la santé et l'environnement. Et c'est dans ce contexte que nous avons entrepris l'étude suivante.

Dans le cadre de la recherche sur la pollution des ressources hydriques au Maroc, nous envisageons dans ce travail, une évaluation spatiotemporelle de la pollution métallique de la basse Moulouya, dont l'objectif est d'évaluer la contamination métallique des ressources hydriques superficielles de la basse Moulouya.

2. Matériels et méthodes

2.1. Présentation de la zone d'étude

L'Oued Moulouya, principal cours d'eau de la région orientale, prend sa source dans la zone de jonction du haut atlas et du Moyen atlas, il est d'une longueur de 520Km avec un bassin versant d'une superficie d'environ 50.000Km² [2], constitué de trois grands compartiments : la haute, la moyenne et la basse Moulouya qui constitue la zone de notre étude.

La région de la Basse-Moulouya est située à l'extrémité Nord-Est du pays en bordure de la Méditerranée et en frontière avec l'Algérie, elle s'étend sur une superficie de 330.000 ha comprenant des montagnes et des plaines. Cette région comprend d'Est en Ouest, les plaines des Triffa, du Sebra, du Bou-Areg et du Garet et est occupée actuellement par d'importants périmètres irrigués en voie d'achèvement.

La basse Moulouya est sous forme de cuvette dont la stratigraphie est diversifiée, elle s'étale depuis le Primaire jusqu'aux dépôts actuels. Ces formations sont composées de granités, basaltes, marnes, marnocalcaires, calcaires dolomitiques, calcaires, grès, gypses et des conglomérats [7].

Le climat général de cette zone est du type méditerranéen semi-aride, avec une aridité plus prononcée dans les plaines du Zebra et du Garet. La majorité des sols des plaines de la Basse Moulouya appartiennent à la classe des sols isohumiques, groupe des sols marron et des sierozems (classification française, 1967) tous deux à profil calcaire différencié.

Le principale affluent de la zone est l'Oued Za, dont le bassin versant a une superficie de 18000 km², prend sa source dans les Hauts Plateaux orientaux. Il draine la partie méridionale et occidentale de la chaîne des Horsts, formée de dolomies et de calcaires plus ou moins marneux, sa direction générale est Sud-est nord-ouest. Il rejoint la Moulouya à Melga El Ouidane, à l'aval de la ville de Taourirt [8].

2.2. Prélèvement et préparation des échantillons

2.2.1. Choix des stations de prélèvement

Prenant en considération les divers activités recensés dans la zone de la basse Moulouya : eaux usées domestiques, industrielles (saison de la compagne oléicole), et agricoles, des échantillons d'eau et de sédiment ont été prélevés selon dix stations (S1 à S10) et qui ont été retenues de telle sorte qu'elles soient accessibles et reflètent les caractéristiques réelles des eaux de surface de l'Oued Moulouya, et qui sont réparties sur le long de la basse Moulouya et de son affluent Oued Za. (Figure 1).

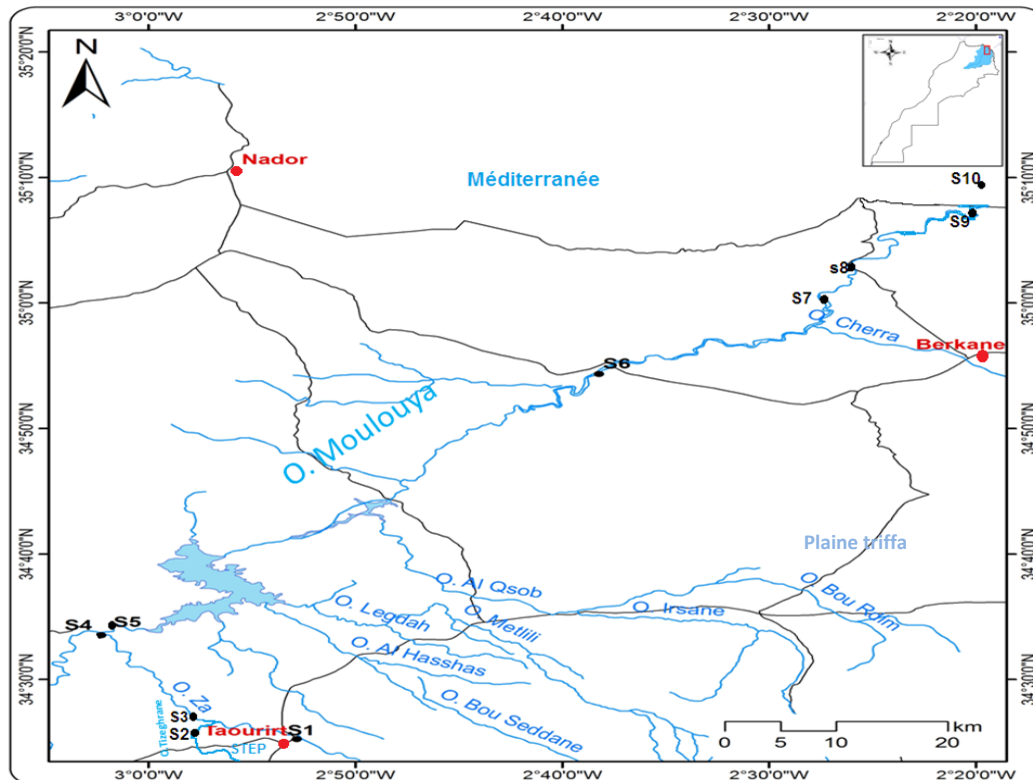


Figure 1: Situation géographique des sites de prélèvements au niveau de la basse Moulouya et ses affluents

- **Station1:** Se situe en amont d'Oued Za, au niveau du pont de Taourirt, elle est choisie afin d'évaluer la qualité des eaux de Oued Za en amant des rejets et des agglomérations (station référence), l'eau est clair avec un débit moyen
- **Station2:** Se trouve au niveau d'Oued Tizghrane: principale rejet d'Oued Za, à 160m avant le point de sa confluence avec Oued Za, le cours d'eau est très sombre, trouble, avec une mauvaise odeur, cette station a pour but de déterminer le degré de la pollution de ce rejet
- **Station3:** Se situe à Oued Za après 200m du point de confluence avec Oued Tizghrane, elle est choisie afin de montrer l'impact de ce rejet sur la qualité d'Oued Za. Le débit est important, dans cette station, nous observons clairement le contact des eaux claires d'oued Za avec les eaux très sombres d'oued Tizghrane.
- **Station4:** Se trouve au niveau d'Oued Za, et s'éloigne de 15km de la station 3, et à 40m avant confluence avec Oued Moulouya (Région Malga El Ouidane), le débit de l'oued est très important. Elle est choisie afin d'estimer la qualité de Oued Za.
- **Station5:** Se trouve au niveau d'Oued Moulouya, à 13m du point de sa confluence avec Oued Za (Région Malga El Ouidane). Dans cette station on note le mélange des eaux d'oued Za avec celles d'Oued Moulouya. Le débit est très important. Cette station a pour objectif de déterminer l'impact d'Oued Za sur la qualité d'Oued Moulouya.
- **Station6:** Oued Moulouya: Se trouve à 53km de la station 5, au niveau du pont Hassan2, le débit est très important.

- **Station7:** Oued Moulouya : Se trouve à 34 km de la station 6, au niveau du pont Cap de l'Eau. Le débit est très important
- **Station8:** Oued Moulouya: cette station se trouve à 2km de la station 7, le débit devient plus important que les autres stations.
- **Station9 :** Se situe au niveau de l'embouchure de la Moulouya: se trouve à 1km de la station 8, le débit de l'eau est fort.
- **Les Stations 6, 7, 8 et 9** ont été choisies afin de suivre la qualité des eaux tout au long d'Oued Moulouya.
- **Station10 :** Au niveau de la Mer méditerranée : à 300m de l'embouchure, c'est une station de référence également.



Photo 1: Oued Za au niveau du Pont de la ville de Taourirt (Station1), **Photo 2 :** Point de confluence d'Oued Za avec Oued Tizaghrane (Station2-3), **Photo 3 :** Point de confluence entre Oued Za et Oued Moulouya (Région Malga al ouidane) (station4-5).

2.2.2. Echantillonnage

Les missions d'échantillonnage saisonnières ont été réparties sur les quatre saisons de l'année allant du printemps de l'année 2012 jusqu'à l'hiver de la même année.

Pour chaque prélèvement un répliquât de trois échantillons a été effectué afin d'avoir les résultats en moyenne pour chaque paramètre

- **Eau**

Les échantillons d'eau ont été prélevés dans des flacons en polypropylène préalablement lavés à l'acide puis à l'eau distillée, et avant prélèvement rincées deux fois avec l'eau du site à échantillonner. Les échantillons d'eau sont acidifiés par de l'acide nitrique pur à 4% puis conservés à 4°C et transportés au laboratoire dans un délai ne dépassant pas 4heures [9].

- **Sédiment**

Il faudrait signaler que tous les échantillons d'eau et de sédiments étaient prélevés sur les mêmes sites. Les sédiments superficiels (5cm d'épaisseur et à peu près 200g) ont été prélevés à l'aide d'une benne sur une surface de 20cm², à la main, dans des sacs en plastiques neufs. Les échantillons de sédiments ont été homogénéisés et conservés à 4°C, puis acheminés au laboratoire, dans un délai ne dépasse pas 4heures.

2.2.3. Préparation des échantillons

- **Les échantillons d'eau**

Les échantillons d'eau ont été minéralisés sur le terrain (acide nitrique pur à 4%), et une fois au laboratoire, un volume de 50ml de chaque échantillon a été filtré à travers une membrane millipore (0.45µm), le tout est conservé au réfrigérateur jusqu'au moment d'analyse.

- **Les échantillons de sédiment**

Les sédiments séchés dans une étuve pendant 48 heures à 80°C, étaient broyés dans un mortier en agate, puis tamisés, seule la fraction de diamètre inférieur à 100µm est retenue. En effet la fraction fine est généralement riche en polluant et contient une grande partie de niveau d'argile, Al-Fe/Mn d'oxyhydroxyde, de silice amorphe et de matière organique/humique qui absorbent activement et concentrent les polluants [10-11-12].

Une quantité de 1g de poids sec de sédiments a été mélangée avec 10ml de HNO₃ (ultra-pur) et 5ml de HClO₄ (ultra-pur) à une température de 150°C pendant 16 heures afin d'avoir une bonne digestion [13].

2.3. Dosages des métaux lourds (ETM) : Spectrométrie d'Emission Atomique Couplée à un Plasma Induit (ICP-AES)

La spectrométrie d'émission analytique est une méthode très sensible permettant de mesurer les teneurs de presque tous les éléments présents dans les solutions aqueuses, organiques ou solides par l'appareil Ultima 2 Jobin Yvon avec une limite de détection de 0,1917 ppb. C'est un instrument largement utilisé en géochimie. Son nom usuel ("ICP-AES") est dérivé des initiales de l'appellation anglaise "Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectroscopy".

Tous les échantillons préalablement préparés, ont été soumis à des analyses des métaux lourds suivant : le Fer (Fe), le Zinc (Zn), le Cadmium (Cd) et le Plomb (Pb), par la méthode ICP-AES (Spectrométrie d'Emission Atomique Couplée à un Plasma Induit) au laboratoire de l'UATRS (Unité d'appui technique à la recherche scientifique) à CNRST de Rabat.

3. Résultats et discussions

3.1. Evaluation de la variation spatiotemporelle de la Contamination métallique des échantillons d'eaux

3.1.1. Le fer

Les résultats des teneurs en fer dans les échantillons d'eau sont présentés dans le tableau 1 :

Tableau 1 : Valeurs des teneurs en fer dans les différents échantillons d'eau en mg/l

	Eté	Automne	Hiver	Printemps	Moyenne
Station1	0,584	0,023	0,16	0,87	0,40925
Station2	4,511	1,947	0,412	1,385	2,06375
Station3	1,186	0,072	0,222	1,466	0,7365
Station4	0,984	0,003	0,29	4,398	1,41875
Station5	5,941	0,004	0,216	5,191	2,838
Station6	0,653	0,791	0,103	0,697	0,561
Station7	0,362	0,404	0,371	0,767	0,476
Station8	0,46	0,336	0,159	0,305	0,315
Station9	0,413	0,404	0,14	0,597	0,3885
Station10	0,263	0,349	1,872	0,665	0,78725

La figure 2 montre l'évolution spatiotemporelle des teneurs en fer au niveau de la basse Moulouya :

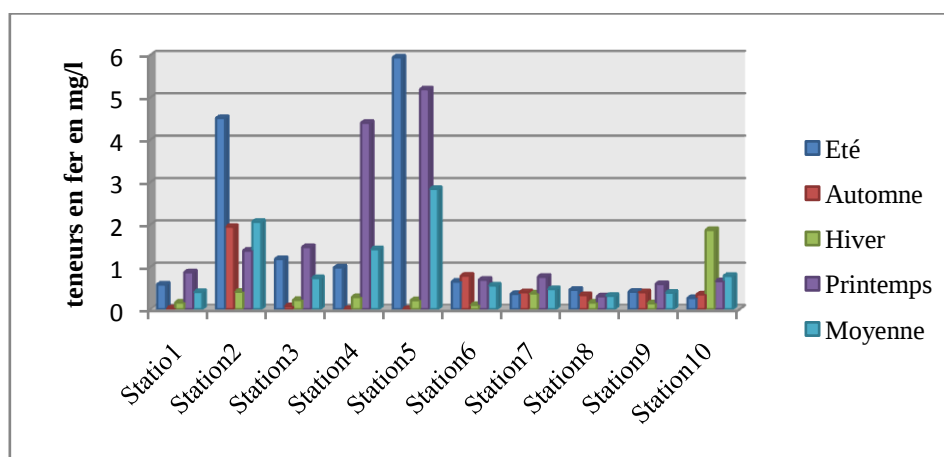


Figure 2 : Evolution spatiotemporelle des teneurs en Fer dans les différents échantillons d'eau exprimées en mg/l

L'évolution spatiotemporelle du fer au niveau des eaux de la basse Moulouya montre que le fer abonde dans tous le bassin à des teneurs variables entre les divers points de prélèvement.

Les valeurs moyennes des teneurs en Fer varient entre 2,83mg/l enregistrée au niveau de la station 5 et 0,315mg /l au niveau de la station 8.

Les valeurs les plus importantes sont enregistrées au niveau des stations soumises à des rejets pollués S2 et S3.

Pendant la saison sèche, le fer présente des teneurs plus élevées que celles de la saison humide.

L'apport industriel (compagne oléicole) ainsi que le lessivage des ordures ménager d'oued Tizeghrane affluent principale d'Oued Za sont principalement originaires de cet apport au niveau des stations soumises à ces rejets, en ce qui concerne les stations 4 et 5, zones d'activité agricole importante, le lessivage des sols peut enrichir l'eau en fer à des valeurs moyenne à faible.

Cependant les valeurs en fer dans la majorité des stations dépassent largement les valeurs naturelles des eaux douces (<30µg/l) [14] et dépassent la valeur limite des eaux destinées à la production de l'eau potable (200 µg/L) et à la valeur impérative des eaux favorables à l'irrigation (5mg/L) [15].

3.1.2. Le plomb

Les résultats d'analyses des teneurs en fer dans les échantillons d'eau sont présentés dans le tableau 2 :

Tableau2 : Valeurs des teneurs en Plomb dans les différents échantillons d'eau (en mg/l)

Stations :	Eté	Automne	Hiver	Printemps	Moyenne
Station1	0,033	0,004	0,007	0,099	0,035
Station2	0,049	0,006	0,006	0,018	0,019
Station3	0,078	0,005	0,005	0,044	0,033
Station4	0,04	0,004	0,004	0,047	0,023
Station5	0,224	0,004	0,004	0,032	0,066
Station6	0,052	0,006	0,004	0,03	0,023
Station7	0,014	0,004	0,007	0,027	0,013
Station8	0,004	0,004	0,007	0,026	0,010
Station9	0,013	0,004	0,004	0,019	0,01
Station10	0,011	0,004	0,015	0,024	0,013

La figure 3 montre l'évolution spatiotemporelle des teneurs en Plomb au niveau de la basse Moulouya :

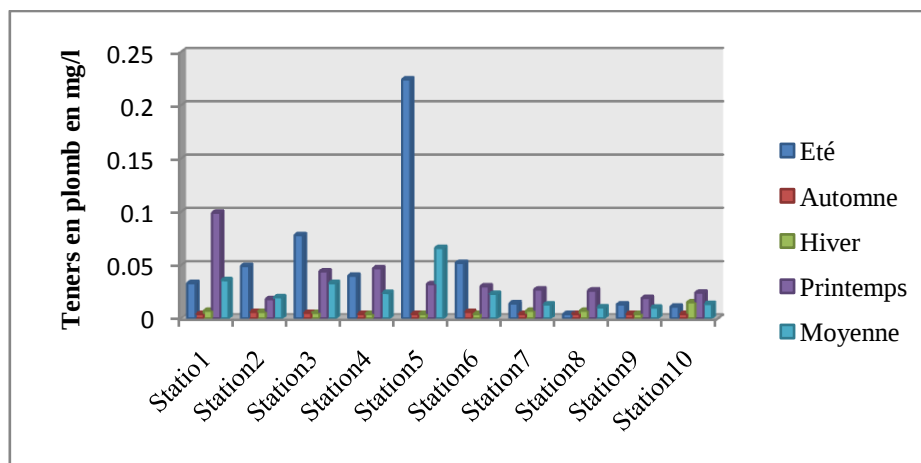


Figure 3: Evolution spatiotemporelle de la teneur en Plomb des différents échantillons d'eau en mg/l

L'évolution spatio-temporelle du Pb au niveau des eaux de la basse Moulouya, montre la présence des teneurs plus au moins faible, avec une valeur moyenne varie entre 0.035mg/l au niveau de la station1 et 0,01révéléé au niveau de la station 9. Les teneurs en plomb sont dans la plupart de stations inférieures à 0,04mg/l pendant les quatre saisons, un maximum des teneurs caractérise la station 5 (Malga El Ouidane), en été, avec une valeur de 0,2mg/l, cependant, une contamination accidentelle dans ce cas peut être par la gazoline des moteurs des

véhicules (camion et tracteur) qui traverse Oued Za en période sèche. Les teneurs du plomb sont aussi élevées en période sèche qu'en période humide, cela peut être due au phénomène de la dilution.

La valeur élevée du plomb au niveau de la station 1 située en amont d'Oued Za au niveau du pont de la ville Taourirt peut être due aux émissions des échappements des véhicules sachant que ce pont connaît un trafic automobile très intense suite à la construction de l'autoroute.

Par ailleurs, la présence du plomb dissous est conditionnée par les valeurs de pH qui oscillent entre 6 et 8 de telles valeurs suggèrent l'existence de deux espèces de Pb solubles Pb^{2+} et $Pb(OH)^+$ avec dominance de ce dernier à pH 8 [16], ce qui est le cas de notre zone d'étude. Le lessivage des sols enrichis par des fertilisants peuvent contribuer à cette contamination en aval d'Oued Za et de la Moulouya (fertilisants phosphaté - azoté) [17], zone qui reçoit principalement les eaux du drainage des plaines de Sebra et de Triffa. Les valeurs de Plomb obtenues au niveau de la basse Moulouya sont largement supérieures à la teneur moyenne des eaux de Seine (France) [18], et inférieures à celles révélés au niveau de bas loukkos [19], et à celles enregistrés dans la même zone de notre étude dans des travaux antérieurs [1]. La contamination en Plomb peut être aussi à l'origine des rejets d'eau usée des villages avoisinants de nos points de prélèvement.

La contamination en plomb est probablement due également au fait que les eaux de la Moulouya drainent les stériles miniers d'Aouli [1].

Par ailleurs, les teneurs en Plomb dépassent largement la teneur moyenne des eaux douces naturelles non contaminées : $0,2\mu g/l$ [17], cependant les eaux de la basse Moulouya sont favorable à l'irrigation (teneur $<5mg/l$) mais dépassent la valeur limite de production de l'eau potable ($50\mu g/l$) [15].

3.1.3. Le zinc

Les résultats des teneurs en zinc dans les échantillons d'eau sont présentés dans le tableau 3 :

Tableau 3 : Valeurs des teneurs en Zinc dans les différents échantillons d'eau exprimé en mg/l

stations	Eté	Automne	Hiver	Printemps	Moyenne
Station1	0,039	0,061	0,077	0,131	0,077
Station2	0,055	0,07	0,087	0,044	0,064
Station3	0,033	0,039	0,063	0,07	0,051
Station4	0,036	0,038	0,094	0,074	0,060
Station5	0,084	0,044	0,082	0,067	0,069
Station6	0,02	0,073	0,15	0,114	0,089
Station7	0,143	0,06	0,116	0,112	0,107
Station8	0,044	0,062	0,1	0,061	0,066
Station9	0,064	0,13	0,089	0,046	0,082
Station10	0,122	0,117	0,097	0,107	0,110

L'évolution spatiotemporelle des teneurs en Zinc est présentée dans la figure 4 :

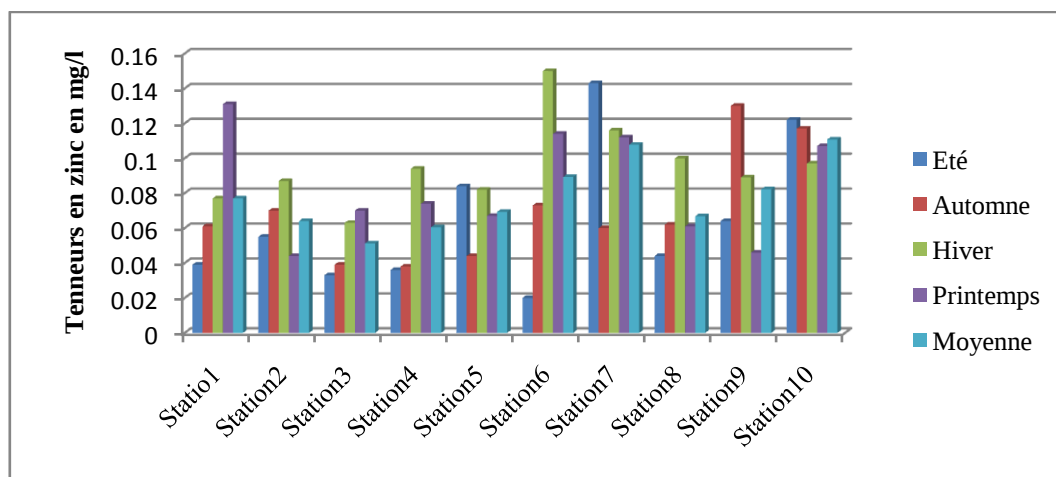


Figure 4 : Evolution spatiotemporelle des teneurs en Zinc dans les différents échantillons d'eau

L'évolution spatio-temporelle du Zn dissous montre des teneurs moyennes généralement faibles, qui varient entre 0,11mg/l au niveau de la station 10 et 0,060mg/l enregistrée au niveau de la station 4.

Cette contamination peut être à l'origine de l'arrivée des contaminants d'origine urbaine en provenance de l'affluent d'Oued Za, quant aux stations situées au niveau de la Moulouya, l'augmentation pourrait provenir du district minier d'Aouli où le principal minéral exploité du gisement est la sphalérite (sulfure de zinc) [1].

Par ailleurs les résultats obtenus restent relativement faibles, et cela peut être lié aux longues périodes de sécheresse qui sont caractérisées l'année de notre étude (2012) où le phénomène de dilution serait absent. En effet, des études similaires ont été réalisées sur l'Oued Moulouya durant une période d'étiage, ont attribué la diminution des teneurs en zinc dissous à la complexations du zinc sur les matières en suspension [1].

Cependant, les valeurs obtenues restent supérieures à celles révélées au niveau de bas loukkos [19].

De ce fait, le zinc présente des valeurs inférieures aux normes des eaux superficielles naturelles douces non contaminées dans toutes les stations de prélèvement (<0,1mg/l) [20].

3.1.4. Le cadmium :

Les résultats des teneurs en cadmium dans les échantillons d'eau sont présentés dans le tableau 4 :

Tableau 4: Valeurs des teneurs en Cadmium dans les différents échantillons d'eau en mg/l

	Eté	Automne	Hiver	Printemps	Moyenne
Station1	0,004	0,002	0,003	0,004	0,003
Station2	0,004	0,01	0,02	0,004	0,009
Station3	0,004	0,012	0,018	0,004	0,009
Station4	0,004	0,01	0,02	0,004	0,009
Station5	0,004	0,004	0,005	0,004	0,004
Station6	0,004	0,004	0,007	0,004	0,004
Station7	0,004	0,0012	0,001	0,004	0,002
Station8	0,004	0,001	0,001	0,004	0,002
Station9	0,004	0,011	0,001	0,004	0,005
Station10	0,004	0,012	0,003	0,004	0,005

L'évolution spatiotemporelle des teneurs en cadmium est présentée sur la figure 5 :

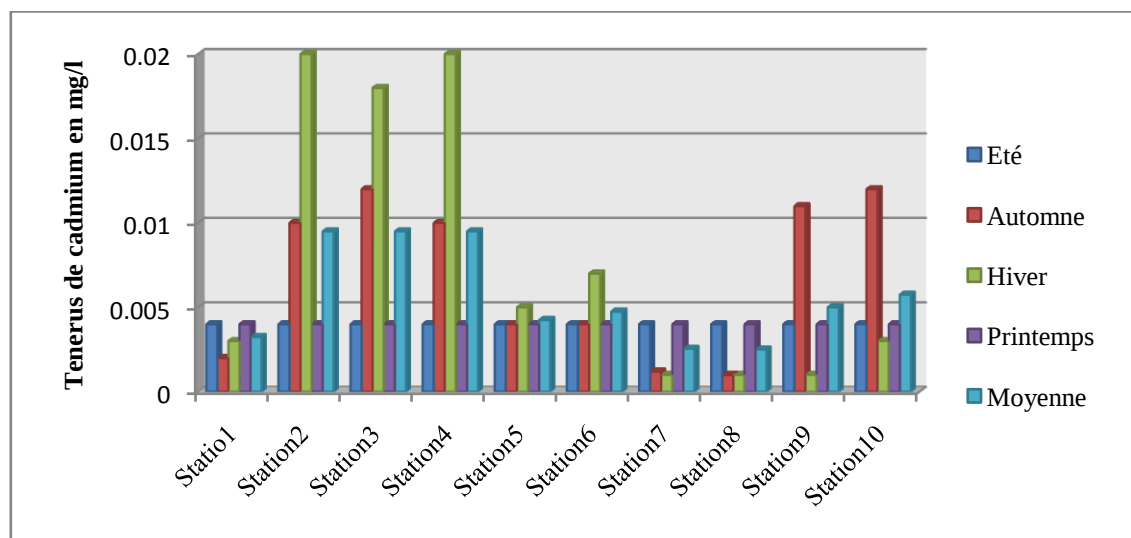


Figure 5 : Evolution spatiotemporelle des teneurs en cadmium dans les différents échantillons d'eau exprimée en mg/l

Les résultats de l'évolution spatiotemporelles des teneurs en cadmium dans les eaux de la basse Moulouya, montrent des valeurs plus au moins faibles, varient entre une valeur moyenne de 0,009mg/l et une valeur de 0,002mg/l, cependant les valeurs obtenues sont largement supérieures à celles démontrées par Bouabdli *et al* dans la pluparts des stations de prélèvement (1), Cette contamination observée peut être expliquée par un apport anthropique drainé à partir de l'Oued Za.

En effet, le cadmium présente des valeurs inférieures aux normes des eaux superficielles naturelles douces non contaminées dans toutes les stations de prélèvement ($<0,03\text{mg/l}$) [20].

Il est indispensable de signaler qu'il est difficile d'entamer une bonne interprétation des résultats à partir des valeurs particulières, de ce fait, on peut établir un ordre d'enrichissement des stations pour chaque métal utilisé, nous représentons les résultats sur le tableau n°5 en admettons que les résultats en cadmium sont très faibles dans tous le bassin, seul les trois éléments fer, plomb et zinc ont été concernés par cet ordre :

Tableau 5 : Ordre d'enrichissement des eaux en éléments métalliques :

Elément métallique	Ordres d'enrichissement
Fer	S5>S2>S4>S10>S3>S6>S7>S1>S9>S8
Zinc	S10>S7>S6>S9>S1>S5>S8>S2>S4>S3
Plomb	S5>S1>S3>S4>S6>S2>S7>S10>S8>S9

Nous avons établi un graphique sémantique différentiel (GSD) pour les différents éléments métalliques de l'eau au niveau des dix stations de prélèvement et pendant les quatre saisons le résultat, nous avons obtenue le résultat représenté dans la figure 6.

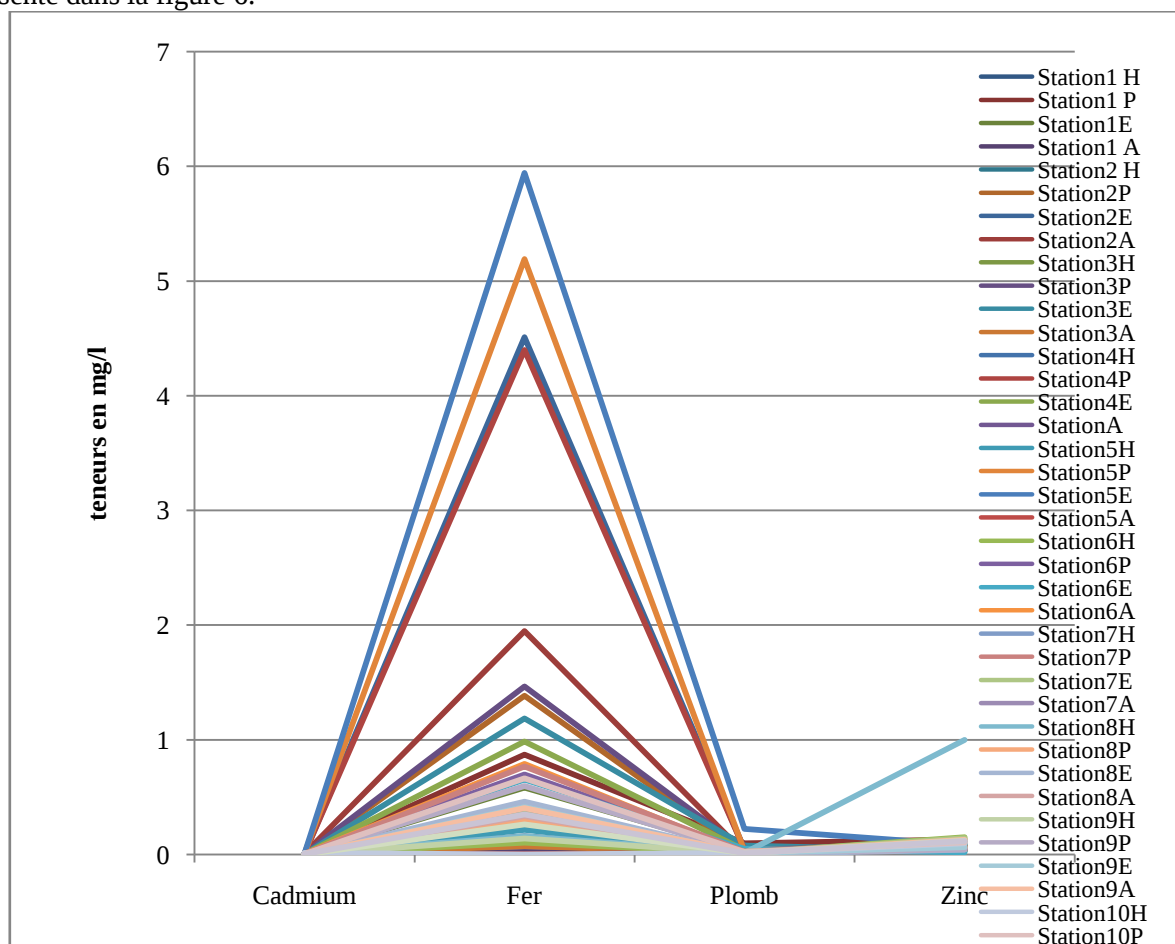


Figure 6 : Graphique sémantique différentiel des éléments métalliques dans les eaux : (A=automne, H=hiver, E=été, P= printemps)

Le graphique sémantique montre que les teneurs les plus élevées sont celles du fer qui présente des valeurs avoisinantes de 6mg/l enregistrées au niveau de la station2 en période estivale.

1.1.1. Evaluation du degré de contamination métallique des eaux de la basse Moulouya :

L'évaluation du degré de la pollution métallique d'un écosystème peut être réalisée en utilisant les résultats bruts des teneurs métalliques, ces derniers constituent un instrument d'évaluation du degré ou d'indice de pollution métallique et des tendances spatio-temporelles qui lui sont associées.

Le degré ou l'indice de contamination (IC), défini comme étant le rapport de la teneur mesurée à une station donnée sur la teneur naturelle mesurée au niveau de la station de référence, Selon [21] [22] :

$$IC = \frac{\text{Teneur du métal au niveau du site étudié}}{\text{Teneur du métal au niveau du site de référence}}$$

L'importance de l'indice de contamination réside dans le fait qu'il permet de comparer le degré de pollution de différentes stations par rapport à une moyenne régionale, dans notre cas on a choisi la station 1 comme station de référence ; compte tenu de sa localisation relativement loin des perturbations d'origine anthropique et de ses faibles teneurs en métaux. Lorsque l'IC est proche de 1, on considère que le site n'est pas ou peu contaminé par les métaux. En général, c'est au delà de 2 que les auteurs admettent que le site est soumis à un début de contamination ; mais lorsque l'IC est inférieur à 1 il s'agit soit d'une erreur analytique ou d'une dilution supplémentaire (Figure 7).

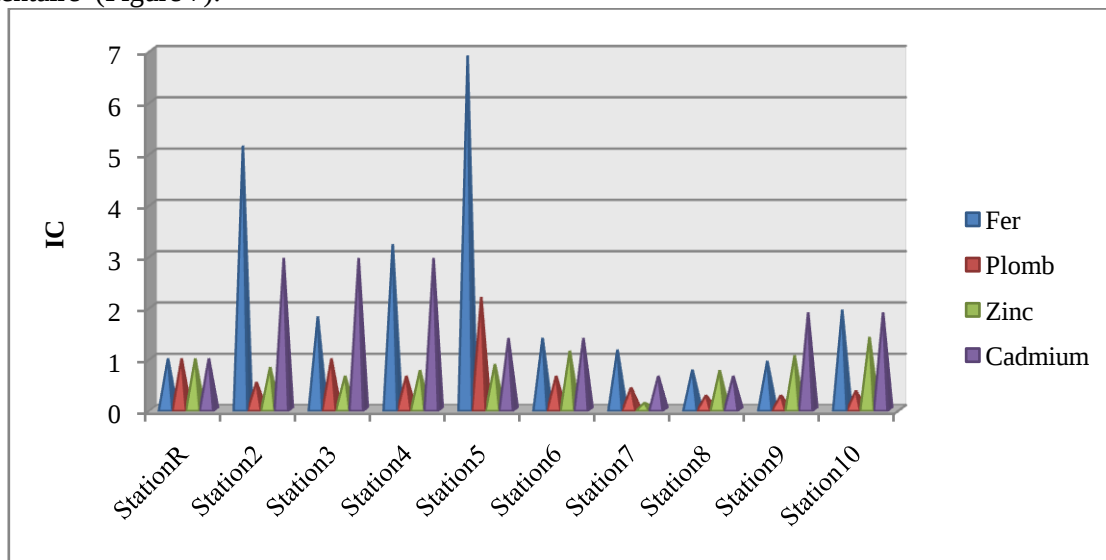


Figure 7 : Variation spatiale de l'indice de contamination des eaux de la basse Moulouya dans les différentes stations d'étude en rapport avec celles trouvées dans la station 1

Pour comparer les différentes stations entre elles, et considérant que tous les métaux étudiés ont le même pouvoir polluant, on peut calculer l'indice de contamination moyen ICM.

Après la détermination des Indices de contamination (IC) pour chaque élément métallique et chaque station ainsi que les ICM (indice de contamination moyen) pendant chaque campagne de prélèvement, les résultats sont présentés dans le tableau 6.

Tableau 6 : Indice de contamination métallique et indice de contamination moyen et indice de contamination moyen total des eaux de la basse Moulouya

IC	Fer	Plomb	Zinc	Cadmium	ICMT
Station R	1	1	1	1	1
Station2	5,15	0,54	0,83	2,96	2,37
Station3	1,82	1	0,66	2,96	1,61
Station4	3,23	0,66	0,77	2,96	1,905
Station5	6,91	2,2	0,89	1,4	2,85
Station6	1,4	0,66	1,15	1,4	1,1525
Station7	1,17	0,43	0,13	0,66	0,5975
Station8	0,78	0,28	0,77	0,66	0,6225
Station9	0,95	0,28	1,06	1,9	1,0475
Station10	1,95	0,37	1,42	1,9	1,41
ICM	2,436	0,742	0,868	1,78	1,4565

Les résultats montrent des IC qui varient selon les métaux étudiés d'une station à l'autre, un $IC > 2$ est bien remarquable au niveau des stations 2, 4 et 5 en ce qui concerne le fer, le plomb présente un $IC > 2$ au niveau de la station 5, alors le cadmium caractérise les stations 3 et 4 avec un $IC > 2$, ces stations témoignent l'impact des activités anthropiques et présentent une dégradation de la qualité de ses eaux (Figure 7).

Dans les autres stations, l'IC ne dépasse pas 2 pour les quatre métaux étudiés :

La variation spatiale des indices de contamination des eaux de la basse Moulouya, montre un gradient décroissant de la pollution, cette pollution caractérise principalement le fer au niveau des stations 2, 3, 4 et 5, les plus proches des rejets, elles reflètent l'impact des rejets de la ville de Taourirt, principalement Oued Tizeghrane.

Pour ces différents indices de contamination, on peut évaluer une appréciation des tendances de la pollution polymétallique qu'il est parfois difficile à mettre en évidence par simple observation des valeurs particulières (Tableau 6 et figure 8) :

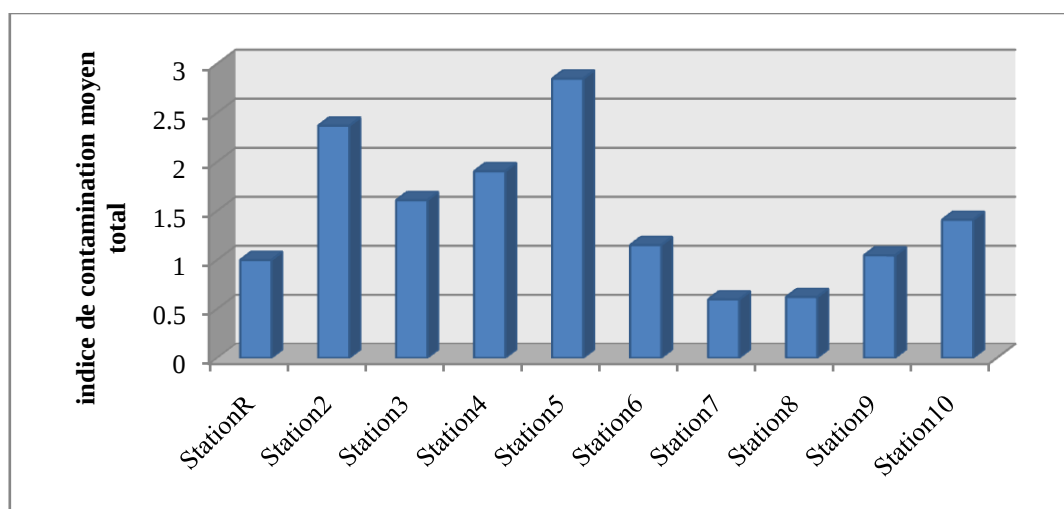


Figure 8: variation spatiale de l'indice polymétallique moyen (fer, plomb, zinc et cadmium) des eaux de la basse Moulouya

L'évolution spatiale de l'indice polymétallique moyen montre que la station 5 présente la teneur la plus élevée, ainsi que la station 2, ce qui traduit la forte pollution métallique de ces deux stations.

En général, les stations situées sur Oued Za et en amont d'Oued Moulouya sont celles qui caractérisent les ICM les plus élevées, ce qui confirme l'effet anthropique destructeur de la qualité des eaux.

1.2. Evaluation de la variation spatiotemporelle de la contamination métallique des sédiments :

Etant donné que la majeure partie des divers polluants couramment observés dans les milieux aquatiques se trouve toujours finalement plus ou moins associée aux sédiments. Il convient donc de surveiller l'évolution des teneurs en métaux lourds au niveau des différents points de prélèvements de notre zone d'étude. Les sédiments (plus que l'eau ou l'air) sont susceptibles d'accumuler les polluants d'origine organique ou inorganique, en effet, ils peuvent constituer une source interne de contamination par métaux par le biais du phénomène de remobilisation qui dépend de la liaison métal-sédiment [23]. Des études ont montré que la distribution des métaux liés aux sédiments dans une rivière peut être affectée par la source et la forme des apports primaires [24], Les caractéristiques physico-chimiques de la rivière [25], la nature et la granulométrie du sédiment [26], les apports des sédiments à partir des affluents, la teneur en matière organique des sédiments et la composition minéralogique du sédiment [27].

1.2.1. Le fer :

Les résultats des teneurs en fer des différents échantillons de sédiments sont présentés dans le tableau 7. L'évolution spatiotemporelle des teneurs en fer dans les différents échantillons de sédiments est présentée dans la figure 9. Le fer est un élément essentiel qui peut être toxique à forte concentration, il est parmi les éléments les plus abondants dans les sédiments de la basse Moulouya.

L'évolution spatiotemporelle du fer au niveau des sédiments de la basse Moulouya montre des valeurs moyennes variant entre 256mg/l au niveau de la station 9, et 27,03mg/l au niveau de la station 6, Ces fortes teneurs de Fe se présentent sans doute sous deux formes du métal.

De toute évidence la majeure partie du fer est contenue dans les fines particules de limon et d'argile sous forme d'hydroxyde de fer communs.

Tableau 7: Valeurs des teneurs en Fer dans les différents échantillons des sédiments exprimées en mg/l

	Eté	Automne	Hiver	Printemps	Moyenne
Station1	123	120	100	87,23	107,55
Station2	230	231	212	200	218,25
Station3	101,2	100,23	99	102	100,60
Station4	96,5	87	73,12	52,02	77,16
Station5	32,3	29,3	27	20	27,15
Station6	13	32	31	32,12	27,03
Station7	69	101	90,12	120	95,03
Station8	123,5	130,3	130	111,2	123,75
Station9	253	270	271,23	230,2	256,10
Station10	263,5	291,02	290,12	198,2	260,71

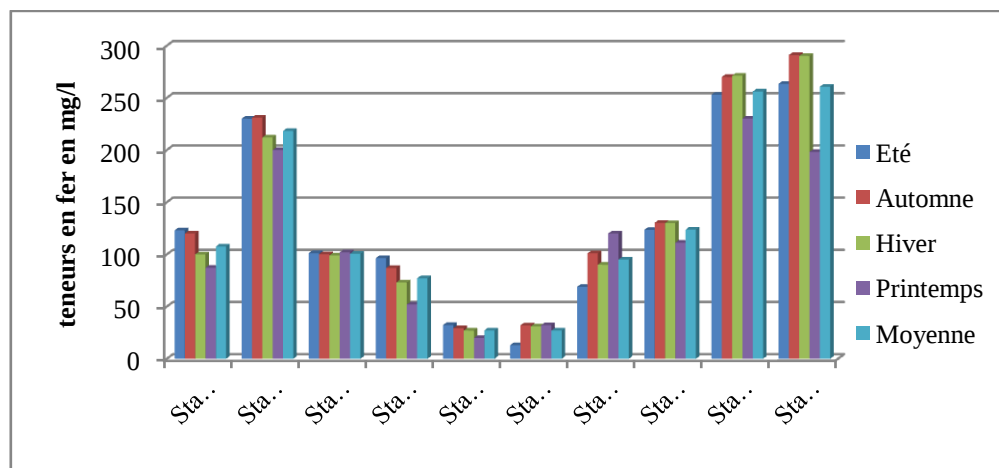


Figure 9 : Evolution spatiotemporelle des teneurs en Fer dans les différents échantillons de sédiments exprimés en mg/l

Le profil longitudinal montre que les teneurs les plus élevées sont enregistrées en aval de la Moulouya au niveau des stations 8, 9 et 10, cette augmentation est s'étalée sur toute les périodes de prélèvement, avec une légère différence pendant la période sèche où ces teneurs diminuent légèrement.

Des teneurs en fer clairement élevées est relevées au niveau de la station 2 avec une valeur maximale de 230mg/l, région fortement soumise aux rejets des eaux usées domestiques et industrielles.

La contamination par le fer pourrait être liée aux activités anthropique, par ailleurs des origines naturelles liées à la nature géologique de la région sont fortement sollicités, tandis que des auteurs [28], ont montré que la forte teneur en Fe peut être liée à la structure des silicates qui font partie des constituants majeurs des sédiments.

En effet, les valeurs des teneurs en fer obtenues au niveau de la basse Moulouya sont inférieures à celles enregistrés au niveau de l'estuaire de Bouregreg, avec une teneur de 16500mg/kg [29], et supérieures à celles relevées au niveau du lac de Fouarat [30].

Des études antérieures ont été réalisées sur l'estuaire de la seine, ont décrivent clairement le comportement du fer au niveau des estuaires [21]. Cependant, le fer a un comportement non conservatif, ce comportement est dû à la réactivité de cet élément, et par conséquent la phase particulaire joue un rôle primordiale dans l'augmentation ou la diminution des concentrations en fer : les teneurs en fer chutent très rapidement dans les faibles salinités puis lentement vers les fortes salinités, le fer stabilisé à l'état dissous sous forme de complexe organique en eaux douces et donc extrait de la colonne d'eaux au profit de la phase particulaire au fur et à mesure, de la pénétration des eaux douces dans les eaux salines, ce type de comportement a été observé dans la plupart des estuaires

mondiaux, on attribue ce phénomène à la floculation des colloïdes et à la précipitation des hydroxydes et des oxydes de fer, conséquences directe de l'augmentation de pH et de la force ionique [21]. Cette description, explique bien l'enrichissement des stations situées au niveau de l'embouchure de la Moulouya en fer, étant donnée les crues que la Moulouya a connu durant la période de notre étude (2011-2012), ce qui pourrait être à l'origine de la chute de la salinité au niveau de l'embouchure.

1.2.2. Plomb :

Les résultats d'analyses du Plomb des différents échantillons de sédiments sont présentés dans le tableau 8 :

Tableau 8 : Valeurs des teneurs en Plomb dans les différents échantillons des sédiments exprimés en mg/l

	Eté	Automne	Hiver	Printemps	Moyenne
Station1	15,65	12,23	10,2	9,02	11,77
Station2	35	52	30,32	10,02	31,83
Station3	25,31	21,3	12,2	7,02	16,45
Station4	23	54,02	13,2	15,2	26,35
Station5	15,25	17,32	21	15,14	17,17
Station6	14,26	10,25	13,5	10,02	12,01
Station7	16,2	9,54	6,23	5,2	9,29
Station8	7	11,13	7,12	7,03	8,07
Station9	5,3	3,38	2,12	1,25	3,01
Station10	6,3	9,72	7,23	9,2	8,11

La figure 10 présente l'évolution spatiotemporelle des teneurs en Plomb :

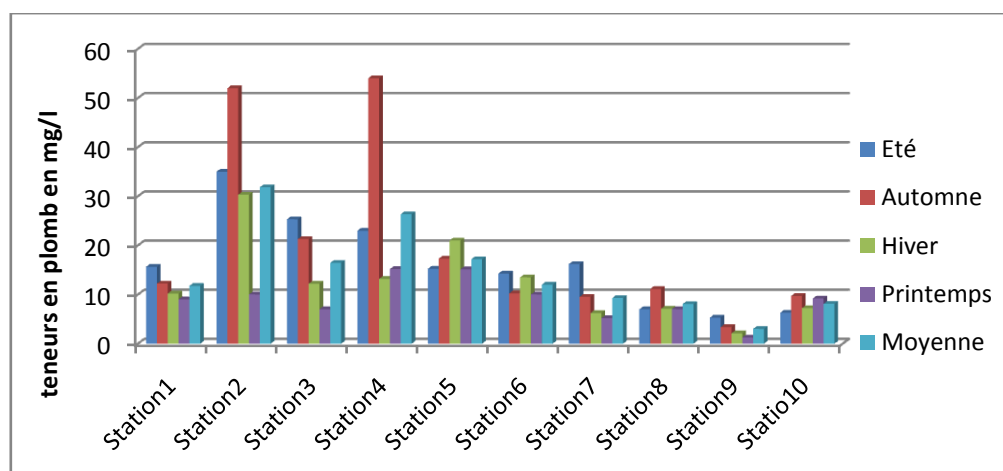


Figure 10 : Evolution spatiotemporelle des teneurs en Plomb dans les différents échantillons exprimés en mg/l

Le Pb est un métal toxique généralement présent en faible quantité. Cependant, l'évaluation spatiotemporelle des teneurs en Plomb au niveau des sédiments de la basse Moulouya montre des moyennes qui varient entre 26,35mg/l caractérise la station 4, et 3,01mg/l enregistrée au niveau de la station 9.

Le profil longitudinal montre que les stations amont présentent les valeurs les plus élevées allant jusqu'à une valeur de 35mg/l au niveau de la station 2 et une valeur de 54,02mg/l au niveau de la station 4, alors que les stations en aval de la Moulouya présentent des valeurs plus faibles, ceci est liée à l'importance des agglomérations industrielles rurales et urbaines, l'abondance des rejets d'eau polluée issue des activités domestiques, industrielles et agricoles, ainsi que le gaz d'échappement des véhicules, sachant que la région connaît une forte mobilité pendant les activités oléicoles.

En effet, le lessivage des sols riches en fertilisants issues des activités agricoles ainsi que le lessivage des déchets solides peut contribuer à cette contamination. Des analyses effectuées sur les ordures ménagères à l'échelle internationale ont révélé des teneurs de l'ordre de 450 mg/kg de Pb [31].

Bouabdelli et al, ont montré des valeurs en plomb inférieures a celles enregistrées dans notre études au niveau de la basse Moulouya, cependant, ils ont déterminé un gradient décroissant des teneurs en Plomb de l'amont d'Oued Moulouya à son aval [1].

1.2.3. Le Zinc :

Les résultats des teneurs en Zinc sont présentés ci-dessous :

Tableau 9: Valeurs des teneurs en Zinc dans les différents échantillons de sédiments exprimés en mg/l

	Eté	Automne	Hiver	Printemps	Moyenne
Station1	36,52	34,21	39	87,23	49,24
Station2	9,1	23,5	20,5	200	63,275
Station3	8,99	19,2	12,2	102	35,5975
Station4	54,1	17,68	20,5	52,02	36,075
Station5	54,1	52	90	20	54,025
Station6	16,2	63	132	32,12	60,83
Station7	31,28	87	98	120	84,07
Station8	11,13	113	13,3	111,2	62,1575
Station9	3,24	13,5	12,3	230,2	64,81
Station10	1,02	17	16	198,2	58,055

La figure 11 donne l'évolution spatiotemporelle des teneurs en Zinc dans les différents échantillons de sédiments exprimés en mg/l :

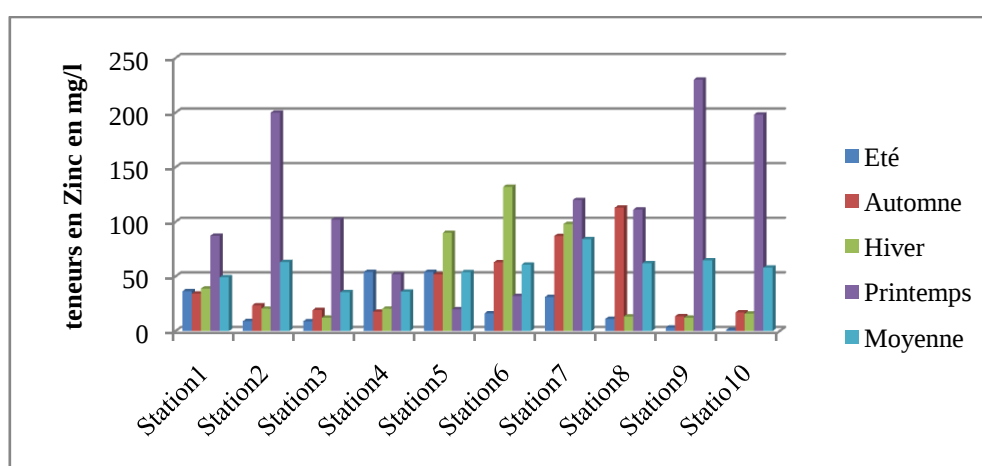


Figure 11 : Evolution spatiotemporelle des teneurs en Zinc dans les différents échantillons de sédiments en mg/l

Le Zn est un élément essentiel à faible teneur, mais qui cause une toxicité aigue à forte dose.

Les teneurs du zinc relevées dans les sédiments de la basse Moulouya montrent des valeurs plus au moins variables, avec une valeur Moyenne qui varie entre une valeur maximale de 84mg/l caractérise la station 7 et une valeur minimale de 35,59mg/l au niveau de la station 3.

Le profil longitudinal montre que les valeurs les plus élevées sont enregistrées en amont de la Moulouya.

Les origines de cette contamination au niveau du bassin de la Moulouya, peut être liées d'une part au lessivages des ordures ménagers, En effet, le zinc constitue 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, [22], 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 Mermut et al [32] ont montré que les fertilisants à base azotée-phosphatée peuvent contenir jusqu'à 83,3 mg de Zn/Kg de fertilisants. Les teneurs obtenues sont inférieurs à celles enregistrées en 2005 par Bouabdli et al dans la même zone d'étude [1], avec une valeur maximale de l'ordre de 949mg/kg enregistrée dans la haute Moulouya (région Aouli) et une valeur minimale 86mg / kg révélée au niveau d'Oued Za correspond à la station n°1 de notre étude.

1.2.4. Cadmium :

Les teneurs en cadmium sont représentées dans le tableau 10 :

Tableau 10 : Valeurs des teneurs en cadmium exprimés en mg/l dans les différents échantillons de sédiments

	Eté	Automne	Hiver	Printemps	Moyenne
Station1	≤0,004	0,013	0,015	≤0,004	0,014
Station2	≤0,004	0,015	0,015	≤0,004	0,015
Station3	≤0,004	0,015	0,014	≤0,004	0,014
Station4	≤0,004	0,015	0,013	≤0,004	0,014
Station5	≤0,004	0,014	0,013	≤0,004	0,013
Station6	≤0,004	0,015	0,012	≤0,004	0,013
Station7	≤0,004	0,014	0,015	≤0,004	0,014
Station8	≤0,004	0,012	0,015	≤0,004	0,013
Station9	≤0,004	0,012	0,015	≤0,004	0,013
Station10	≤0,004	0,012	0,015	≤0,004	0,013

La figure 12 présente l'évolution spatiotemporelle des teneurs en cadmium en mg/l :

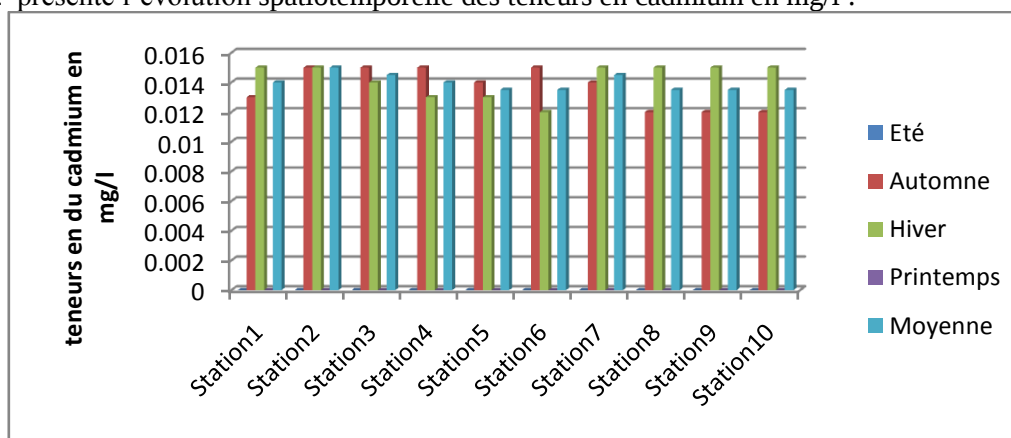


Figure 12 : Evolution spatiotemporelle des teneurs en cadmium dans les différents échantillons de sédiment exprimés en mg/l.

Le cadmium est après le mercure le plus toxique des métaux lourds pour les animaux aquatiques, L'évaluation spatiotemporelle des teneurs en cadmium présente des valeurs très faible dans tout le bassin de la Moulouya. Les teneurs moyennes du cadmium montrent une valeur maximale de 0,015mg/l et une valeur minimale de l'ordre de 0,0135mg/l enregistrée dans la plupart des stations.

Les valeurs étudiées sont enregistrées pendant l'hiver et l'automne alors que les analyses des échantillons prélevés pendant l'été et le printemps, présentent tous des valeurs inférieures ou égales à 0,004mg/l.

La contamination par cet élément peut avoir des origines atmosphériques, agricoles (fertilisants) et domestiques. En effet, des analyses des métaux sur les fertilisants phosphatés et potassés ont révélé des teneurs allant jusqu'à 6,3 mg de Cd/Kg [33].

Par ailleurs, les valeurs obtenues sont inférieurs à celles montrées par Bouabdli et al en 2005 dans la même zone d'étude avec des valeurs maximale en cadmium de 0.23mg/kg [1].

Nous pouvons établir un ordre d'enrichissement des sédiments en éléments métalliques, cela est présenté dans le tableau 11 :

Tableau 11 : Ordre d'enrichissement des sédiments en éléments métalliques :

Elément métallique	Ordres d'enrichissement
Fer	S10>S9>S2>S8>S1>S3>S7>S4>S5>S6
Zinc	S7>S9>S2>S8>S6>S10>S5>S1>S4>S3
Plomb	S2>S4>S5>S3>S6>S1>S7>S10>S8>S9

Nous avons établi un graphique sémantique différentiel pour les différents éléments métalliques des sédiments dans les différentes stations d'étude lors des différentes campagnes, le résultat est représenté dans la figure 13 :

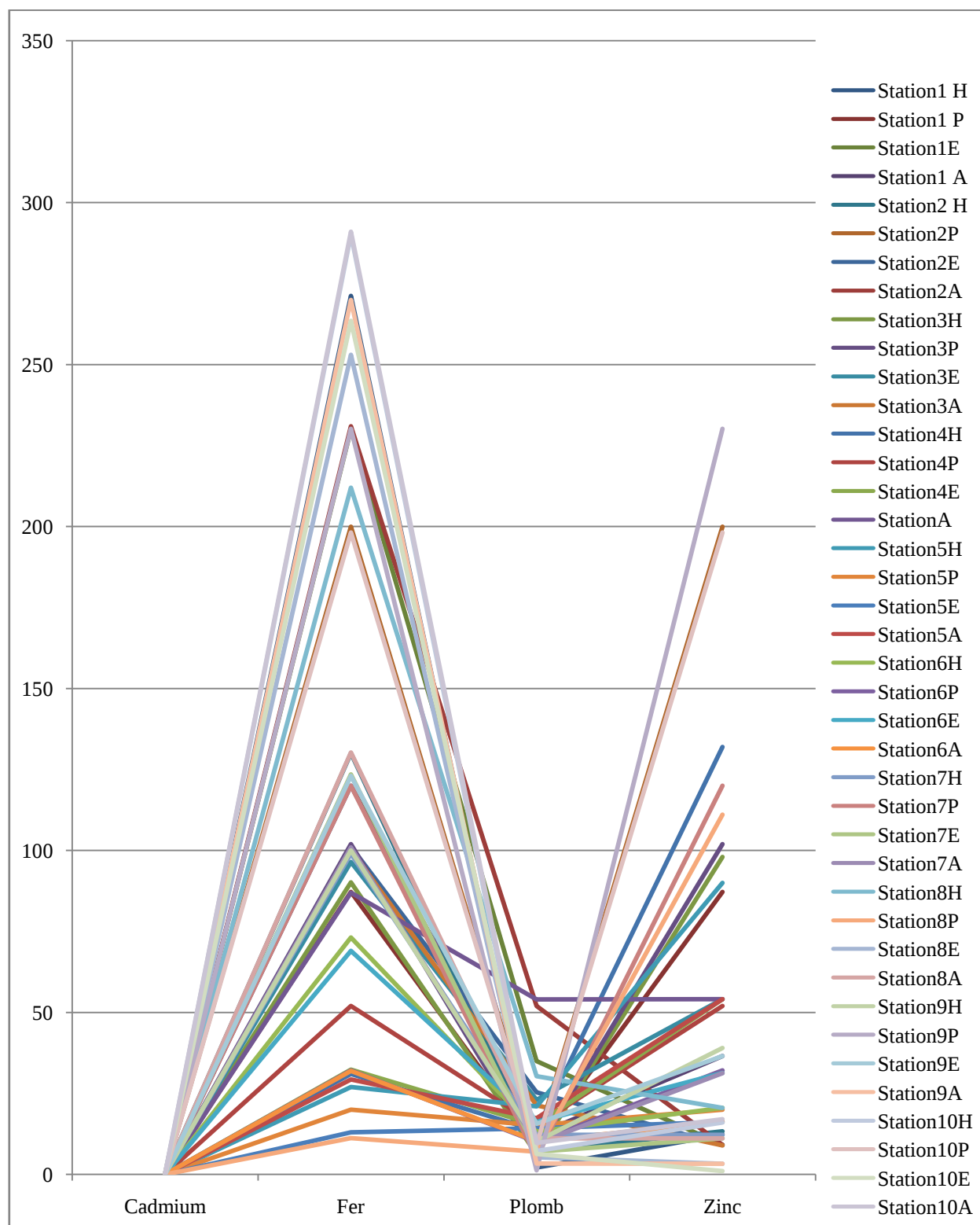


Figure13: diagramme sémantique différentiel des éléments métalliques dans les sédiments de la basse Moulouya (A=automne, H=hiver, E=été, P=printemps)

Le graphique sémantique montre que les teneurs les plus élevées sont celles du fer et du zinc qui présentent des valeurs avoisinantes de 300mg/l et 250mg/l, respectivement, enregistrées au niveau des station10 et 9.

1.2.5. Evaluation du degré de contamination métallique des sédiments de la basse Moulouya :

Nous avons choisi la station 1 comme station de référence, et après la détermination des Indices de contamination (IC) pour chaque élément métallique et chaque station ainsi que les ICM (indice de contamination moyen) pendant chaque campagne de prélèvement, les résultats sont présentés sur le tableau 12 :

Tableau 12 : Indice de contamination métallique et indice de contamination moyen et indice de contamination moyen total des sédiments de la basse Moulouya :

IC	Fer	Plomb	Zinc	Cadmium	ICMT
Station R	1	1	1	1	1
Station2	2,03	2,7	1,28	1,07	1,77
Station3	0,93	1,39	0,72	1,03	1,0175
Station4	0,717	2,23	0,73	1	1,16925
Station5	0,25	1,45	1,09	0,96	0,9375
Station6	0,25	1,01	1,23	0,96	0,8625
Station7	0,88	0,78	1,7	1,03	1,0975
Station8	1,15	0,68	1,26	0,96	1,0125
Station9	2,38	0,25	1,31	0,96	1,225
Station10	2,42	0,68	1,17	0,96	1,3075
ICM	1,2007	1,217	1,149	0,993	1,139925

IC = Teneur du métal au niveau du site étudié / Teneur du métal au niveau du site de référence

Les résultats montrent des IC qui varient selon les métaux étudiés d'une station à l'autre, un IC>2 est bien remarquable pour le fer, au niveau des stations 2, 9 et 10, alors que le plomb présente un IC>2 au niveau des stations 2 et 4, le cadmium et le zinc présentent des IC inférieurs à 2 dans toutes les stations :

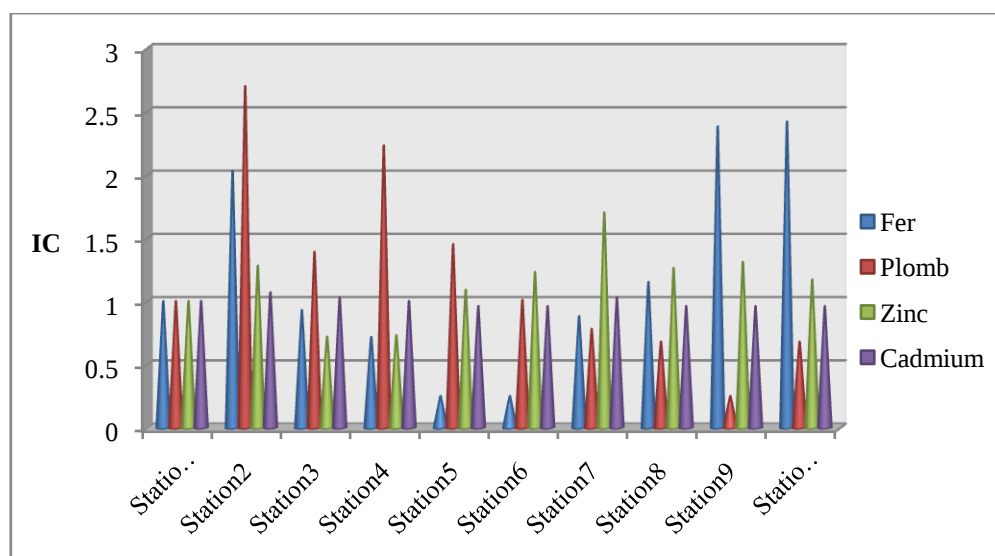


Figure 14: Variation spatiale de l'indice de contamination des sédiments de la basse Moulouya dans les différentes stations d'étude en rapport avec celles trouvées dans la station 1

L'analyse de la figure ci-dessus permet de relever une dominance des IC du plomb dans les stations 2 et 4, et du fer dans les stations 2, 9 et 10.

Comme déjà mentionné, les stations les plus proches des activités urbaines et agricoles sont les stations qui ont tendance à enregistrer des IC les plus élevés, comme le cas ainsi des stations 2 et 4.

Par ailleurs les stations en aval de la Moulouya enregistrent parfois des valeurs moyennes à importantes en métaux lourds, comme c'est bien illustré dans la figure ci-dessus.

Cela est expliqué, en partie, par la forte activité agricole faisant appel à un usage intensif d'engrais phosphatés, de fongicides et d'insecticides et qui sont responsables d'un apport important en métaux et qui entrent dans la composition de ces substances, c'est le cas du zinc et du fer pour les fongicides, du cadmium qui est un résidu des composés phosphatés.

En effet, Le comportement du fer au niveau des estuaires est non conservatif, il dépend du degré de la salinité, et en comparant les résultats enregistrés dans les sédiments avec celle révélés dans l'eau, on pourra lier les valeurs faibles dans cette dernière à une faible salinité au niveau de l'embouchure.

D'après Avoine et al, L'enrichissement en fer extractible observé, en crue et en étiage, à la limite et parfois en amont de l'intrusion saline (crue de vives-eaux, au fond lors de la pleine mer) s'expliquerait par une remontée de sédiments vers l'amont. Ce phénomène prendrait toute son ampleur en étiage, lorsque l'influence des marées est maximum [34].

Des études antérieures ont été réalisées sur l'estuaire de la seine, ont clairement décrit le comportement du fer au niveau des estuaires [21]. Cependant, le fer a un comportement non conservatif, ce comportement est dû à la réactivité de cet élément, et par conséquent la phase particulaire joue un rôle primordiale dans l'augmentation ou la diminution des concentrations en fer : les teneurs en fer chutent très rapidement dans les faibles salinités puis lentement vers les fortes salinités, le fer stabilisé à l'état dissous sous forme de complexe organique en eaux douces et donc extrait de la colonne d'eaux au profit de la phase particulaire au fur et à mesure, de la pénétration des eaux douces dans les eaux salines, ce type de comportement a été observé dans la plupart des estuaires mondiaux. On attribue ce phénomène à la floculation des colloïdes et à la précipitation des hydroxydes et des oxydes de fer, conséquences directe de l'augmentation de pH et de la force ionique [21]. Cette description, explique bien l'enrichissement des stations situées au niveau de l'embouchure de la Moulouya en fer, étant donnée les crues que la Moulouya a connue durant la période de notre étude (2012), ce qui pourrait être à l'origine de la chute de la salinité au niveau de l'embouchure.

Les teneurs en métaux lourds enregistrées au niveau des sédiments de notre site d'étude, ont été comparées à celles enregistrées au niveau de l'estuaire de Bouregreg dont le but d'évaluer leur degré de contamination, la comparaison montre que les sédiments de Bouregreg sont beaucoup plus chargés en métaux lourds que ceux de la basse Moulouya [35]. Cependant, les teneurs en plomb et zinc dépassent celles rencontrés au niveau des sédiments de la baie d'Alger [36].

Pour comparer les différentes stations entre elles, et en considérant que tous les métaux étudiés ont le même pouvoir polluant, on peut calculer l'indice de contamination moyen ICM polymétallique ICMT : (tableau 12 et figure 15) :

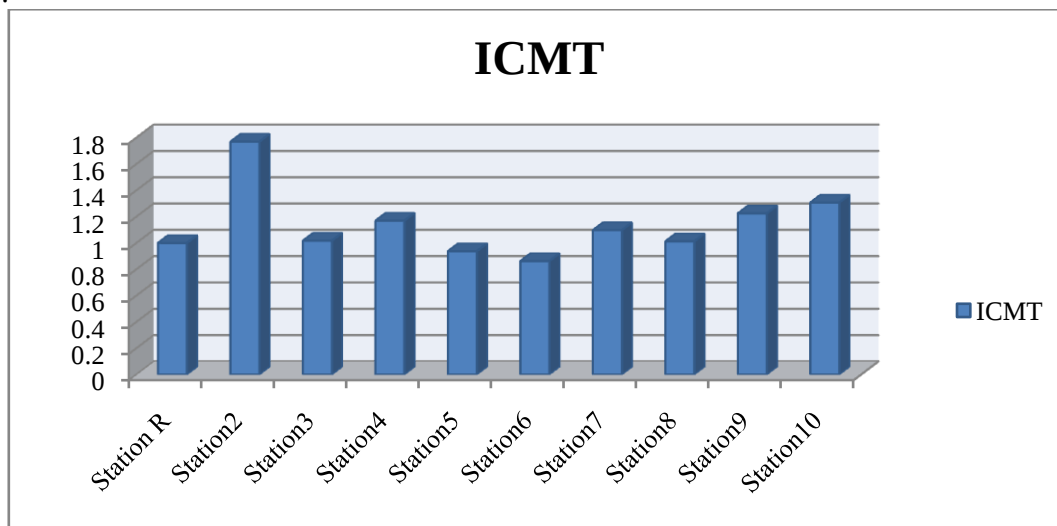


Figure 15 : Evolution spatiale de l'indice polymétallique moyen (fer, plomb, zinc et cadmium) des sédiments de la basse Moulouya

L'évolution spatiale de l'ICM polymétallique montre que la station 2 présente l'IC le plus élevé avoisinant de 2. Par ailleurs, elle est considérée comme la plus polluée.

Conclusion :

Les résultats obtenus dans ce travail nous ont permis de faire une évaluation de la contamination métallique des ressources hydriques superficielles de la basse Moulouya.

Notre étude fourni un exemple adéquat d'une pollution intense occasionnée par des conditions hydrochimiques sérieusement influencées par des rejets domestiques et industriels très chargés en polluants dans des conditions de climat semi aride.

D'après les résultats des analyses élémentaires des eaux et des sédiments de la basse Moulouya, nous pourrions donner une estimation de la charge polluante métallique dans les points suivants :

- La pollution métallique montrée dans les analyses des échantillons d'eau est clairement confirmée dans les analyses des sédiments ;
- Le fer est l'élément le plus abondant dans les eaux et les sédiments de la basse Moulouya ;
- Le Plomb et le zinc présentent des valeurs modérées à importantes, alors que l'ensemble des échantillons contient des teneurs relativement faibles en cadmium.

Les analyses ont montrés que les valeurs les plus élevées des métaux lourds étudiés, sont enregistrées aux niveaux des stations avoisinantes des activités anthropiques et des unités industrielles et agricoles, soumises aux apports des eaux polluées (la ville de Taourirt). Oued Tizeghrane en relation directe avec Oued Za présente une forte pollution par les eaux usées, ajoutant à cela la possibilité du lessivage des sols riches en fertilisants et qui peut enrichir l'eau par ces polluants, l'apport minier est très sollicité aussi, du fait que les eaux de la Moulouya drainent des stériles minières provenant de la haute Moulouya. Par ailleurs, vers l'aval, les eaux de drainages (riches en fertilisants) des plaines agricoles (Triffa) ne fait que détériorer la qualité de ces eaux.

Le suivie spatiotemporelle de la contamination métallique, a révélé une diminution de la charge polluante allant de l'amont à l'aval de la Moulouya.

Le calcul de l'indice de contamination (IC) et l'indice polymétallique moyen (ICTM) qui tiennent compte des teneurs de la station de référence confirme une contamination métallique des eaux et des sédiments de la basse Moulouya.

Les processus d'accumulation des ETM dans les sédiments sont assez importants par rapport à ceux relatifs à l'eau du bassin de la Moulouya.

De point de vue qualité, les teneurs en Zinc et cadmium sont inférieurs aux normes d'irrigation et de potabilité, celles du fer dépassent les normes de potabilité et d'irrigation, alors que les teneurs en Plomb qualifient les eaux de la basse Moulouya de favorables à l'irrigation et non à la potabilité.

De ce fait, l'ensemble des résultats montre que les eaux de la basse Moulouya présentent des signes de dégradation.

Cependant, la préservation des ressources hydriques devient une impérative et dans le but de diminuer l'impact des rejets pollués sur la qualité des eaux de la Moulouya, un traitement préalable des rejets des eaux usés domestiques, agricoles et industrielles, avant diversement dans le milieu naturel, est fortement sollicité, ainsi que des études de plus en plus approfondies sur les origines de cette pollution sont aussi très recommandés.

Références

1. Bouabdli A., Saidi N., M'Rabet S., Escarre J., Le blanc M., *Rev. Sci. Eau* 18(2), (2005) 199-213.
2. Makhoukh M., Sbaa M., Berrahou A., Clooster Van M., *Larhyss Journal*, 09, (2011) 149-169.
3. Prad. Projet de Développement et d'Aménagement Régional de l'Oriental. Rapport de prospective Ministère chargé de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement, de l'Urbanisme et de l'Habitat (Maroc), (1999).
4. Azaoui S., Métaux lourds dans le bassin versant du Sebou, géochimie, source de pollution et impact sur la qualité des eaux de surface. Thèse nationale, Université Ibn tofail , Kénitra, (1999) 120.
5. Juvanovic S., Carrot F., Deschamps N., Vukotic P.A., *Journal of Trace Microprobe Techniques*, (1995) 463-471.
6. Bhattacharya A., Routh J., Jacks G., Bhattacharya P., Morhit M., *Applied Geochemistry*, 21, (2006) 1760-1780.
7. Bendahhou Z., La zone littorale de la Moulouya (Maroc nord-oriental) : Transits sédimentaire, évolution morphologique géochimie et état de la pollution,. Rabat, Maroc. : Thèse de 3^o cycle, Université Med V, (1995).
8. Kennedy V.C., Zellwager G .W., Jines B .F., *Water resources research*, 10 (1974) 785-790.
9. Rodier J. L'analyse de l'eau. 8^{ème} édition, paris, (1996).
10. Forstner U., Patchineelam S.R., *Chem. Soc. Adv. Chem. Ser.* 189 (1980) 177-193.
11. Thorne L.T., Nickless G., *The Science of the Total Environment*, Amsterdam. 19 (1981) 207-213
12. Reintner J., Kralik M., *Sterr. Geol. Ges.*, 88 (1997) 79-96.
13. Cook R., Bioavailability of Trace Métal in Urban Contaminated Soil, PhD thesis.: Département of Natural Resource Sciences. McGill University. Québec. Canada, (1998).
14. Berrahou A., Chananon G., Bellouali A., Richoux P., *Soc.Linn*, (2001) 127-131.

15. Norme Marocaine de qualité des eaux. Arrêté conjoint du Ministre de l'équipement et du Ministre chargé de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme, de l'habitat et de l'environnement n°1275-01 du 10 Chaabane 1423, (17- 10-2002) définissant la grille de qualité des eaux de surface. Rabat, Bulletin Officiel Maroc, N°5062.
16. Hem D., Durum H., *Water J. A. W.* 5(8) (1973) 562-568.
17. Trefry JH, Presley BJ. *Enviro. geol* 1 (1976) 283-294
18. Idlafkih Z, Cossa D, Meybecks M., *Hydro.Ecol* 7 (1-2) (1995) 127-150.
19. El Morhit.M., Hydrochimie, éléments métalliques et incidences ecotoxicologiques sur les différentes composantes d'un écosystème estuarien (bas loukkous)-thèse de doctorat. Rabat : université mohamedV, (2009).
20. Norme Marocaine de qualité des eaux . Rabat : Arrêté conjoint du Ministre de l'équipement et du Ministre chargé de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme, de l'habitat et de l'environnement n°1275-01 du 10 Chaabane 1423, (17- 10-2002) définissant la grille de qualité des eaux de surface. Rabat, (2002).
21. Boust D. Programme seine-aval.fer et manganèse-reactivité et recyclage : Université de Rouen.laboratoire de morphodynamique continentale et côtière, (1981).
22. Rousseaux A R., Navaro A., Vermande P., *Tribune de l'eau*, (1991) 17-25.
23. Bouih H., Ben H., Nassali H., Srhiri A., *Journal de la Société Chimique de Tunisie*, 4 (10), (2001) 1279-1286.
24. Bradley S.B., Cox J J., *Total Environ*, 50 (1986) 103-128.
25. Geesey G.G., Borstad L., Chapman P.M. *Water Res*, 18 (1984) 233-238.
26. Jenne E.A., Kennedy V.C., Burchardj. M., Ball J.W., *Science Publishers*, 2 (1980) 169-190.
27. Wolfenden P.J., Lewin J.,*Catena*, 4 (1977) 309-317.
28. Weiller K., Welken R.D., Inter. conf. 2, (1987) 227-229.
29. Khamar M., Cherkaoui E., Nounah A., Bioaccumulation des métaux lourds par la flore de la zone humide de l'estuaire de Bouregreg. 4ème édition du congrès international : Eau, Déchets et Environnement. Agadir, 18- 20 Décembre 2013.
30. BenBouih H., Nassal H., Leblan S., Srhiri A., *Afrique SCIENCE* 01 (1) (2005)109-125.
31. Berrow M L., Webber J., *J. Sci. Food. Agric*, 23 (1972) 93-100.
32. Mermut A R., Jain J C., Song L I., Kerrich R., Kozac L., Jana S., *Journal of Environmental Quality*, 25 (1996) 845-853.
33. Leoppert R. H., Raven k. p., *J. Enviro. Qua.*, 26 (1997) 551-557.
34. Avoine J., Dubrulle L., Larsonneur C., La dynamique sédimentaire dans les estuaires de la baie de Seine. Conséquences sur l'environnement. (1985).
35. Nadem S., El Baghdadi M., Rais J., Barakat A., Evaluation de la contamination en métaux lourds des sédiments de l'estuaire de Bou Regreg (Côte atlantique, Maroc)., *J. Mater. Environ. Sci*, 6 (11), (2015) 3338-3345.
36. Guendouzi Y., Ghalmi R., Boudjella M., El morhit M., Impact des métaux traces sur l'écosystème à *Posidonia oceanica* dans La Baie d'Alger (Impact of metals traces on the ecosystem at *Posidonia oceanica* in the Bay of Algiers)., *J. Mater. Environ. Sci.* 6 (4), (2015) 918-923.

(2016) ; <http://www.jmaterenvironsci.com/>