

Contribution à l'étude de l'impact d'un site minier abandonné dans la haute Moulouya sur la qualité de l'Oued Moulouya, Maroc

Mohamed MAKHOUKH^{1*}, Mohamed SBAA¹, Ali BERRAHOU¹ et Marnik VANCLOOSTER²

¹ *Université Mohammed Premier, Faculté des Sciences, Centre de l'Oriental des Sciences et Technologies de l'Eau, Oujda, Maroc*

² *Université Catholique de Louvain, Faculté de Bioingénierie Agronomique et Environnementale, Unité Génie Rural, Louvain-La-Neuve, Belgique*

* Correspondance, courriel : makhomed@yahoo.fr

Résumé

Dans le but d'évaluer le degré de contamination chimique des eaux et des sédiments superficiels de l'oued Moulouya (Maroc) qui draine les centres miniers d'Aouli, de Mibladen et de Zaida, abandonnés sans réhabilitation dans haute Moulouya et d'estimer l'extension possible des éléments traces métalliques (ETM) au niveau du secteur aval, des échantillons d'eau et de sédiments ont été prélevés le long de l'oued Moulouya, en vue d'en déterminer les teneurs en ETM : Plomb (Pb), Arsenic (As), Zinc (Zn), Cuivre (Cu) et Cadmium (Cd) en période sèche et en période de pluie, et établir un diagnostic de l'état actuel de la pollution.

Dans les sédiments superficiels de l'oued Moulouya, les analyses ont permis de mettre en relief le degré élevé de pollution par le Zn et le Pb dans la station S3 en aval de ces sites miniers dans la haute Moulouya, avec des valeurs maximales respectives de 191,62 et 156,72ppm, dépassant les normes internationales des sédiments des rivières (88ppm pour le Zn) et (22ppm pour le Pb). Par ailleurs, dans les stations situées plus en aval (S8, S10, S11 et S13), les rejets urbains des agglomérations avoisinantes de l'oued Moulouya contribuent aussi à cette contamination par un apport anthropique qui se traduit par une augmentation des teneurs en ETM.

Or, la mise en place du barrage Hassan II sur l'oued Moulouya a toute fois limité les apports en eaux fluviales et par conséquent diminué son pouvoir d'évacuation des polluants émanant des sites miniers de la haute Moulouya vers l'aval de l'oued. En effet, la comparaison des teneurs en As, Pb, Zn, Cu et Cd avec les normes Marocaines, montre que les eaux superficielles de l'oued Moulouya sont de qualité moyenne à excellente. Mais, l'accumulation des ETM dans les sédiments superficiels en teneurs excessives, dont le pourcentage élevé, pourrait être lié aux années qui ont précédé l'édification du barrage, ce qui représente un risque potentiel pour l'écosystème aquatique par relargage de ces éléments, au moindre changement des conditions physico-chimiques du milieu.

Mots-clés : *Maroc, Oued Moulouya, éléments traces métalliques, contamination, sédiments, eaux, mines, résidus miniers.*

Abstract**Contribution to the study of the impact of an abandoned mine site in the Moulouya high on the river's Moulouya quality, Morocco**

In order to assess the degree of chemical contamination of surface water and sediments of Oued Moulouya (Morocco), which drains the mining centers of Aouli, Mibladen and Zaida, abandoned without rehabilitation in high Moulouya and estimate the possible extension of trace metals (ETM) in the downstream sector. Thus, water samples and sediments were collected along the Oued Moulouya, in order to determine the levels of ETM: Lead (Pb), Arsenic (As), Zinc (Zn), Copper (Cu) and Cadmium (Cd) in dry and rainy season, and diagnose the current state of pollution.

In surface sediments of the river Moulouya, analysis helped to highlight the high degree of pollution by Zn and Pb in the S3 station downstream of mining sites in the upper Moulouya, with maximum values respectively 191.62 and 156.72 ppm, exceeding the international standards of river sediments (88ppm for Zn) and (Pb 22ppm louse). Moreover, in stations located further downstream (S8, S10, S11 and S13), discharges of urban settlements surrounding the wadi Moulouya also contribute to the contamination by anthropogenic input resulting in increased levels of ETM. However, the implementation of the dam on the Wadi Hassan II Moulouya a limited time any river water intake and consequently reduced its power to discharge pollutants from mining sites of high Moulouya downstream of the wadi. Indeed, the comparison of levels of As, Pb, Zn, Cu and Cd with Moroccan standards shows that the surface water of the river Moulouya are average to excellent. But the accumulation of ETM in surface sediments in excessive levels, the percentage could be related to years prior to the construction of the dam, which represents a potential risk to the aquatic ecosystem by leaching of these elements at the slightest change in the physicochemical conditions of the environment.

Keywords : *Morocco, Oued Moulouya, trace metals, contamination, sediment, water, mining, tailings.*

1. Introduction

Au Maroc, la contamination métallique des écosystèmes aquatiques a attiré l'attention de chercheurs d'horizons très différents. Elle constitue en effet, l'un des aspects de la pollution le plus menaçant pour ces milieux. Par ses effets néfastes, elle pourrait engendrer des situations critiques voire dangereuses affectant parfois l'équilibre écologique de ces écosystèmes. En effet, cette pollution constitue un problème d'actualité qui préoccupe toutes les régions soucieuses de maintenir leur patrimoine hydrique à un haut degré de qualité. Cette préoccupation touche la région de la haute Moulouya dont la quelle l'exploitation minière a connu une activité importante depuis les années 1972 jusqu'au 1985. Dans cette exploitation, le plomb représente une large part, sa production dépassant les 170000 Tonnes de concentrés soit environ 3,5 % de la production mondiale de plomb [1].

Le Pb exploité à ciel ouvert est sous la forme de cérusite à 70 % et de galène à 30 %, associés à la barytine rose très abondante, et à d'autres minéraux d'oxydes de Pb, les arkoses constituent le type lithologique auquel appartient la totalité du minerai économiquement exploitable [2]. Après l'épuisement des sites miniers d'Aouli, Mibladen et Zaida en 1975 et la fermeture du centre minier en 1986 sans réhabilitation dans la haute Moulouya, de nombreux résidus métallurgiques et des rejets de laverie ont été générés. Ces résidus peuvent constituer une source de contamination en raison de la libération et de la dispersion des métaux. Ce centre situé sur les berges d'oued Moulouya peut présenter alors un risque pour

l'environnement et pour les riverains qui utilisent les eaux des carrières, laissées à ciel ouvert non remblayées et plus ou moins remplies d'eau.

Plusieurs travaux ont étudié l'étendue et le degré de telles contaminations [3-4]. C'est dans ce contexte que nous avons entrepris l'étude de l'impact des résidus des districts miniers de la haute Moulouya sur les composantes eau et sédiments de l'oued Moulouya.

Cet oued qui draine la quasi-totalité du Maroc oriental et les districts (Aouli - Mibladen - Zaida) dans sa partie amont est d'une longueur de 520 km et présente le plus grand fleuve marocain se jetant dans la Méditerranée avec un bassin versant d'une superficie d'environ 50000 km².

Le présent travail a pour objet d'évaluer l'impact et le degré de contamination des sites miniers abandonnés dans la haute Moulouya et de comprendre le transfert vers l'aval des métaux dans l'oued Moulouya. Pour cela des échantillons d'eau et de sédiments ont été prélevés dans l'oued Moulouya et dans le lac et les flaques de carrières à ciel ouvert au niveau des sites miniers. Ces échantillons ont fait l'objet d'analyses physicochimiques et d'éléments traces, ainsi que des résidus miniers (halde et terrils) ont été prélevés pour l'analyse des éléments traces.

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation générale du secteur de l'étude

Le bassin versant de la Moulouya est subdivisé en trois sous bassins : la haute, la moyenne et la basse Moulouya (*Figure 1*). Ce cours d'eau reçoit trois affluents importants : l'Anzeghmir dans la Haute Moulouya puis successivement, le Melloulou et le Za dans la basse Moulouya. Ces affluents jouent fortement sur les fluctuations de débit de la Moulouya, avec leurs régimes hydrologiques très irréguliers qui se caractérisent par un étiage estival sévère et des crues violentes aux autres saisons. Aussi trois retenues barrages sont implantées sur cet oued : Hassan II dans la haute Moulouya, Mohamed V et Mechra- Homadi dans la basse Moulouya.

Géographiquement, la cuvette de la haute Moulouya constitue l'extrémité occidentale de la meseta oranaise, constituée de deux massifs primaires dont la mise en place a provoqué la formation d'une minéralisation poly- métallique d'importance majeurs.

Cette région constitue le plus gros district du royaume du Maroc [5], les principaux minéraux présents dans ce district sont la galène, la blende, la barytine, la césurite, la chalcosite, la chalcopryrite, la pyrite, la limonite, la géothite [6].

Ce cours d'eau traverse le long de son parcours des terrains d'âge paléozoïques, recoupés par des intrusions granitiques hercyniennes sur lesquels vient se déplacer en discordance une couverture mésozoïque [7]. Dans la haute Moulouya, des formations jurassiques (calcaires, calcaires dolomitiques, marno- calcaires), crétacées (marnes, grès et calcaires) ainsi que des formations tertiaires et quaternaires (marnes, conglomérats et gypses [8] dans la moyenne Moulouya.

Son régime pluviométrique est marqué par des faibles précipitations conjuguées à une extrême variabilité et irrégulières. Le total pluviométrique moyen de 1967 à 2000 est de 199,54 mm/an [9], parfois plus si les conditions climatiques le favorisent. Les précipitations neigeuses tiennent au sol plusieurs jours, voire quelques semaines et elles constituent une importante source de ruissellement superficiel.

En outre, l'oued Moulouya a une importance socio-économique capitale pour les habitants de son bassin (irrigation, abreuvement, eau potable, industries...), mais, il draine le district minier dans la haute Moulouya et reçoit la majorité de la charge polluante générée par les agglomérations avoisinantes (villes de Midelt, Missour, Outat El Haj, Tindit, Guercif, ...) et rejetée en permanence sans traitement préalable.

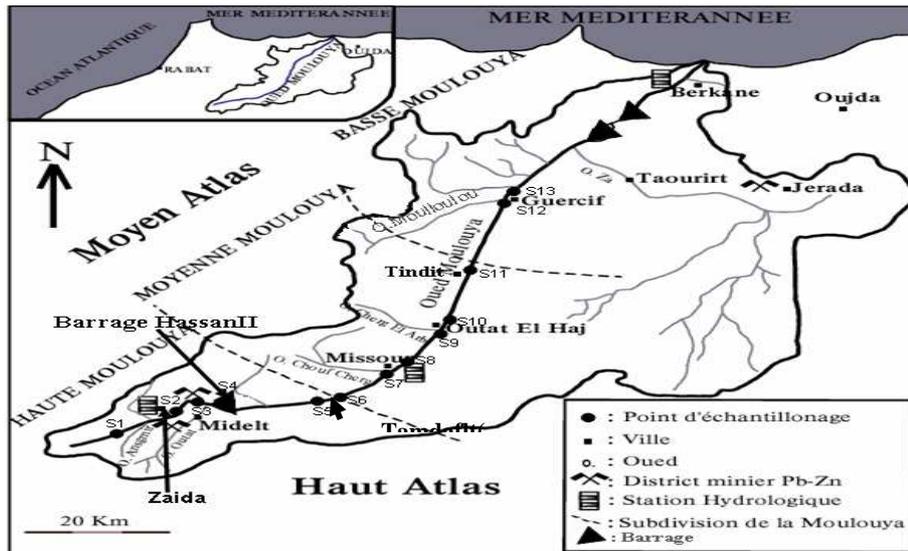


Figure 1 : Situation géographique des sites de prélèvements au niveau de l'Oued Moulouya

2-2. Sites d'échantillonnage

Pour l'évaluation du degré de contamination métallique des eaux de surface et des sédiments de l'oued Moulouya, un échantillonnage sur le terrain a été effectué en période de pluie (mois de février-2006), cette période montre une pluie intense et une crue violente et en période d'étiage (mois de juillet-2007), durant cette période les tributaires sont presque à sec à l'exception des stations S5, S6, S12 et S13.

13 stations d'études (S1 à S13) réparties dans la zone d'étude ont été retenues, de telle sorte qu'elles soient accessibles et reflètent les caractéristiques chimiques principales des eaux et des sédiments.

Dans chaque station, trois prélèvements ont été réalisés dans le but de déterminer les concentrations en ETM dans les sédiments et/ou dans la phase dissoute. Par ailleurs, pour prendre en compte l'impact probable des activités humaines tout au long de l'oued Moulouya, les échantillons ont été choisis à proximité des principales agglomérations :

- Station 1 (S1) elle est choisie sur l'oued Moulouya comme une station de référence loin des apports anthropiques domestiques, industriels et agricoles, elle se situe à 10km de la mine. Dans cette station l'oued est en crue durant la première campagne et à débit pratiquement nul pendant la deuxième campagne.
- Station 2 (S2) : située au voisinage du centre minier et en aval du point des rejets liquides de la ville de Zaida. Sur la rive droite du fleuve, il y a présence de certaines végétations aquatiques. Dans cette station la dynamique fluviale est similaire à celle de la station S1.
- Station 3 (S3) : située en aval du centre minier abandonné, approximativement à 450 km de l'embouchure. La dynamique fluviale est similaire à celles des stations S1 et S2 avec présence sur la rive gauche d'une digue à stérile.
- Station 4 (S4) : située au niveau du barrage Hassan II.
- Station 5 (S5) : située en amont du pont de Tamdaft, et en aval de la retenue du barrage. Dans cette station l'eau est claire et le débit de l'eau est moyen.
- Station 6 (S6) : située en aval de Tamdaft, lieu de production de Ghassoul (argile saponifère). Dans cette station l'eau est trouble et le débit de l'eau est moyen.

- Station 7 (S7) : située en amont de la ville de Missour. Dans cette station, le débit de l'eau est moyen en période de pluie et pratiquement nul en période sèche et en note la présence d'algues.
- Station 8 (S8) : située en aval du point de rejets liquides de la ville de Missour à 310 km de l'embouchure. Dans cette station le débit de l'eau est moyen en période pluvieuse avec présence d'algues filamenteuses, mais en période estivale, le cours d'eau draine presque les eaux usées générées par la ville de Missour dans un lit large.
- Station 9 (S9) : située en amont de la ville d'Outat El Haj. Dans cette station le débit de l'eau est moyen en campagne de pluie et très faible en période sèche avec présence de quelques algues filamenteuses dans un lit très large.
- Station 10 (S10) : située en aval du point de rejets liquides de la ville d'Outat El Haj. Les déchets solides sont déposés aléatoirement sur la rive gauche. Dans cette station le débit de l'eau est moyen en période de pluie et faible en période sèche avec dominance des eaux usées et prolifération d'algues filamenteuses dans un lit très large.
- Station 11 (S11) : située à proximité de la ville de Tindit à 255 Km de l'embouchure. Dans cette station, le débit de l'eau est moyen en période hivernale et très faible en période estivale.
- Station 12 (S12) : située à proximité de la confluence de l'oued Moulouya avec l'oued Meloullou. Dans cette station, l'oued est en crue en période de pluie. Mais en période sèche, l'eau est claire et son débit est moyen.
- Station 13 (S13) : située en aval du point de rejets liquides de la ville de Guercif approximativement à 155 km de l'embouchure. Dans cette station, l'oued est en crue en période pluvieuse et l'eau est trouble et son débit devient plus important que dans les autres stations se trouvant en amont en période sèche.

2-3. Technique d'analyse

Les échantillons d'eau ont été prélevés à l'aide de bouteilles en plastique, préalablement rincées avec l'eau de la station. Ils ont été ensuite acidifiés sur le terrain avec de l'acide nitrique (HNO_3), conservés à 4°C et transportés au laboratoire.

Les sédiments destinés aux analyses ont été prélevés au niveau de la couche superficielle à l'aide d'une benne à main, sur les berges de l'oued Moulouya, sur les berges du lac et des falques de carrières à ciel ouverts. Ces échantillons ont été recueillis dans des sacs en plastique. Au laboratoire, ils sont séchés à l'étuve pendant 48 h à 80°C, broyés dans un mortier et tamisés dans un tamis à maille inférieure à 100µm. une prise de 100 mg de sédiment sec a été minéralisée à 120°C pendant 4 heures en présence de 4 mL d'acide fluorhydrique et 2 mL d'un mélange d'acide chlorhydrique et d'acide nitrique (v/v). Après refroidissement, la solution obtenue est filtrée et le dosage des ETM a été effectuée sur les minéralisas après dilution [10-12].

Les concentrations en Pb, Zn, As, Cd et Cu dans l'eau et sédiments ont été analysées par l'ICP-AES (Inductively Coupled —Plasma /Atomic —Emission-Spectrometry) au laboratoire de CNRST à Rabat.

Les paramètres ayant fait l'objet d'analyses in situ sont la température de l'eau, la température de l'air et le pH.

La mesure de la température des eaux a été déterminée au moment du prélèvement, à l'aide d'un thermomètre gradué au 1/10 et étalonné. Aussi, la température de l'air a été déterminée au même moment et au même endroit de prélèvement avec le même thermomètre, tout en prenant les précautions habituelles [13]. Pour le pH, il a été mesuré aussi sur le terrain avec un pH mètre portable étalonné, type WTW-LF9.

Quand à la conductivité des eaux, elle a été mesurée dès l'arrivée au laboratoire par un conductimètre modèle HI8033. La valeur de la conductivité trouvée est ramenée à la température standard de 20°C, à l'aide des tables donnant des facteurs de corrections [13].

3. Résultats et discussion

3-1. Analyses physico-chimiques

3-1-1. pH

Les valeurs retrouvées révèlent que le pH est légèrement neutre à alcalin dans toutes les stations de l'oued Moulouya ($7 < \text{pH} < 8$), aussi bien en période de pluie qu'en période sèche. Ceci est dû à la présence de carbonates qui permettent de tamponner les eaux de surface qui s'écoulent vers l'oued Moulouya en ruisselant et en s'infiltrant dans la couverture marno - dolomitique et calcaire, ainsi que dans les résidus de traitement nus riches en minéraux carbonatés déposés aux abords. De même le minerai de Zaida étant essentiellement carbonaté constitué essentiellement de cérusite à 70 % dans des arkoses du Permo - Trias [14] (*Figure 2*).

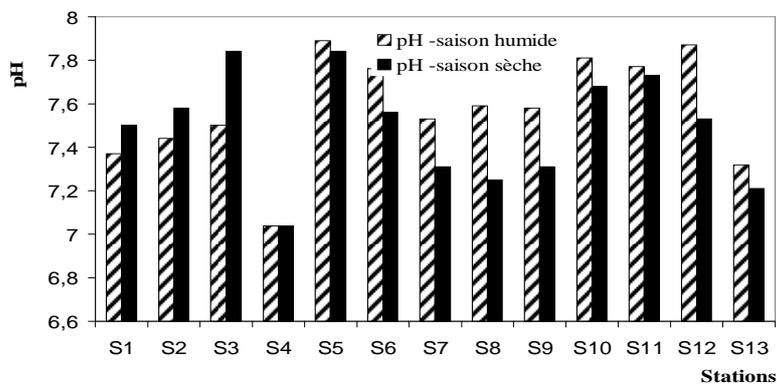


Figure 2 : Variation Spatio-temporelle des valeurs du pH

3-1-2. Température

La température des eaux des sites étudiés varie de $9,8^{\circ}\text{C}$ en période hivernale à 29°C en période sèche avec une moyenne de $17,5^{\circ}\text{C}$. Cette température est influencée alors par celle de l'air qui dépend-elle même des variations saisonnières. Or, l'effet de cette température enregistrée, sur la capacité d'adsorption des sédiments n'est pas très significatif [15]. Mais, en présence de la matière organique, elle peut avoir un rôle indirecte, par exemple en augmentant sa dégradation, ce qui peut produire des substances acides et complexantes [16] (*Figure 3*).

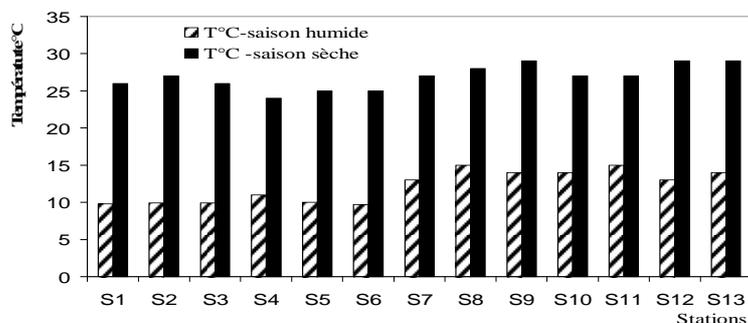


Figure 3 : Variation Spatio-temporelle de la température

3-1-3. Conductivité

La mesure de la conductivité constitue une bonne appréciation du degré de minéralisation d'une eau où chaque ion agit par sa concentration et sa conductivité spécifique. Les valeurs moyennes enregistrées, montrent des variations importantes. Elles fluctuent entre 435 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à S1 et 3920 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à S8 dans les eaux de surface de l'oued Moulouya dépassant la norme marocaine des eaux de surface (2700 $\mu\text{S}/\text{cm}$) [17], indiquant une minéralisation excessive attribuée au lessivage et au ruissellement des résidus miniers à partir des digues à stérile (Figure 4).

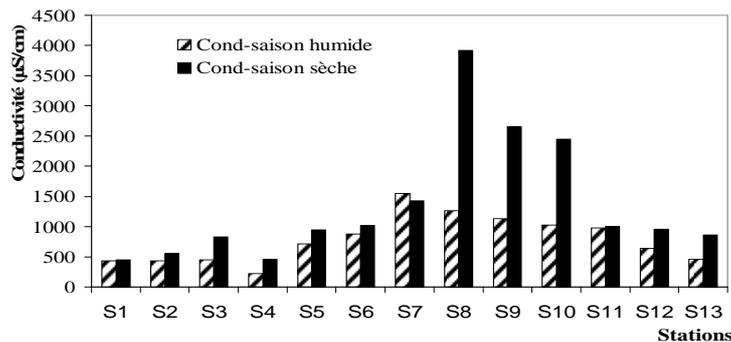


Figure 4 : Variation spatio-temporelle de la conductivité

3-2. Évaluation du degré de contamination métallique de l'oued Moulouya

3-2-1. Contamination des eaux

Le suivi de l'évolution spatio-temporel de la pollution métallique des échantillons d'eau, prélevés au niveau des différentes stations de l'oued Moulouya, montrent des teneurs variables en As, Pb, Zn, Cu et en Cd (Figure 5). En effet, les concentrations observées dans la partie dissoute de cet oued, ont tendance à augmenter de l'amont vers la station S3 située en aval des districts miniers d'Aouli – Mibladen – Zaida où on a enregistré des teneurs maximales pour tous les éléments, puis elles diminuent progressivement vers l'aval de cet oued.

Les concentrations dissoutes du Cd et du Cu ne sont pas aussi élevées que celles de l'As, Zn et Pb, mais les profils de répartition entre les différentes stations, montrent une certaine similarité caractérisée par des augmentations au niveau de la station S3 pour tous les éléments surtout pendant la période de pluie pendant laquelle nous avons enregistré généralement des teneurs élevées par rapport à la période sèche. Cette augmentation en As, Zn et en Pb dans la station S3 située en aval du centre minier, peut être due au fait que les eaux de la Moulouya drainent les stériles miniers de la région de la haute Moulouya, qu'est une zone minéralisée où on rencontre des grains de galène, de barytine, de cérusite, de chalcocite, de chalcopyrite, de pyrite, de limonite, de goéthite... [6]. L'augmentation des concentrations en période hivernale, peut s'expliquer par le lessivage des ces stériles miniers par de fortes pluies qui s'abattent sur le site. Ces dernières peuvent conduire à un ruissellement qui transporte les métaux vers les eaux de surface d'oued Moulouya.

La diminution des teneurs en ETM dans la retenue du barrage située en aval de la station S3, peut être expliqué par le phénomène de dilution lié à des quantités importantes d'eau qui arrivent au barrage, ce qui signifie, que ce barrage a un rôle important dans l'amélioration de la qualité de l'eau dans la moyenne et la

basse Moulouya par la dilution des polluants. La capacité hydraulique donc à évacuer une pollution vers l'aval de l'oued est limitée par ce type d'ouvrage. En effet, les teneurs enregistrées dans les stations situées en aval du barrage pendant les deux périodes sont faibles. Ces faibles teneurs pourraient aussi être attribuées à leur adsorption par les matières en suspension et par la matière organique. En effet, la zone étudiée est caractérisée par des formations carbonatées où le pH varie entre 7 et 8 ce qui favorise l'adsorption et la complexation des métaux dont la plupart devient insoluble et précipite.

Dans l'oued Moulouya et en aval des districts miniers d'Aouli-Mibladen-Zaida, les concentrations maximales en As, Zn, Pb, Cu et en Cd ont été enregistrées dans la station S3 et sont respectivement de 17,15 $\mu\text{g/l}$, 4,25 $\mu\text{g/l}$, 2,36 $\mu\text{g/l}$, 0,98 $\mu\text{g/l}$ et 0,21 $\mu\text{g/l}$. Les apports qui contribuent à cette augmentation peuvent être liés aux eaux de ruissellement qui lessivent à la fois les résidus et les stériles miniers riches en ETM et aussi aux sédiments déposés dans l'oued Moulouya qui peuvent relarguer les ETM dans les eaux de surface. Quand à l'As, il peut avoir aussi comme origine les roches et les sols naturels dans cette région.

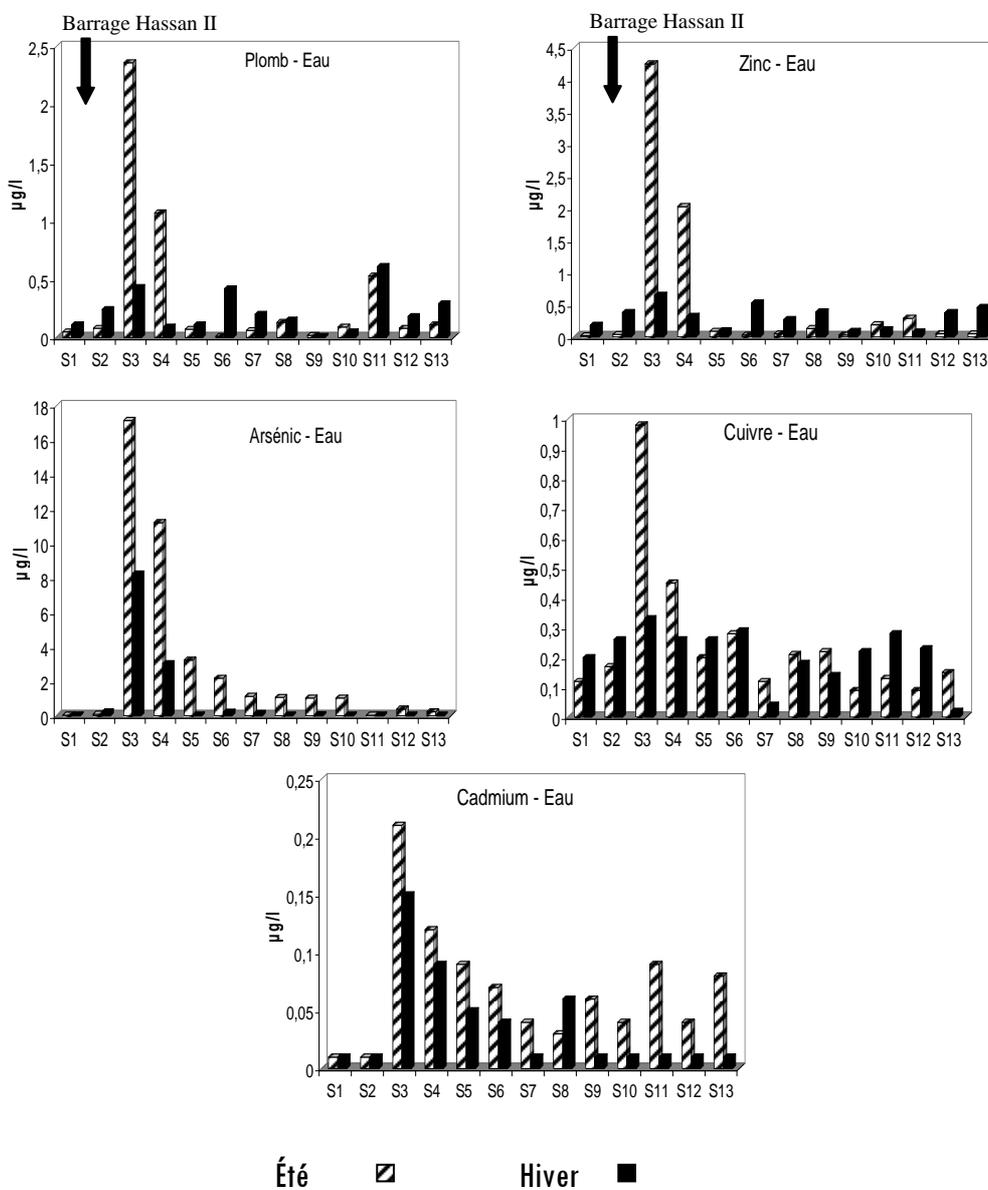


Figure 5 : Variation spatio-temporelle de la teneur moyenne des éléments traces métalliques au niveau de l'eau et les sédiments de l'oued Moulouya

Une légère augmentation de la teneur en Pb a été constatée au niveau de la Station S11 (Tindit), elle peut s'expliquer par l'existence dans cette région d'indice de minéralisations de Pb [18]. Le lessivage entraîne alors cet élément vers les eaux de surface d'Oued Moulouya, ce qui confirme les résultats de certains auteurs sur la région [19].

Par ailleurs, les concentrations du Pb, Zn et Cu dans les eaux de surface de l'oued Moulouya sont inférieures aux teneurs moyennes des eaux naturelles douces estimées à $3\mu\text{g/l}$ pour le Pb [20], à $10\mu\text{g/l}$ pour le Zn [21] et à $1,8\text{ mg/l}$ pour le Cu [22-23], et elles sont également inférieures aux normes marocaines ($50\mu\text{g/l}$ pour le Pb et le Zn, et $10\mu\text{g/l}$ pour le Cu) [17]. Cependant, les teneurs en Cd et en As dépassent respectivement la teneur moyenne des eaux douces non contaminées : $0,07\mu\text{g/l}$ [24] et la teneur moyenne des eaux douces naturelles : $0,45\mu\text{g/l}$ [25], mais, elles restent inférieures aux normes Marocaines ($5\mu\text{g/l}$ pour le Cd et $50\mu\text{g/l}$ pour l'As) [17].

A travers ces résultats, on peut déduire que la mine abandonnée de la haute Moulouya a un impact sur les eaux de surface d'oued Moulouya en station S3. Néanmoins, le cours d'eau arrive à récupérer ses qualités naturelles via la mise en place du barrage Hassan II. En effet, selon les normes marocaines [17], les eaux de surface de l'oued Moulouya sont de qualité moyenne à excellente.

3-2-2. Contamination des sédiments

L'analyse spatiale des éléments traces métalliques au niveau des sédiments de l'oued Moulouya (**Figure 6**), montre généralement que, les concentrations maximales sont celles du Zn ($191,62\text{ppm}$) suivi par le Pb ($156,72\text{ppm}$), le Cu ($26,75\text{ppm}$), l'As ($10,44\text{ppm}$), ceci en S3 et en période sèche, et le Cd ($1,86\text{ppm}$ en S10 et en période pluvieuse). Les stations S3 et S10 présentent donc les taux le plus élevés en éléments métalliques notamment dans le cas du Zn, Pb, Cu et As en S3 et dans le cas du Cd en S10 en comparaison avec la station S1 localisée plus en amont de l'oued.

Les concentrations les plus élevées ont été enregistrées au niveau de la station S3. Elles peuvent être expliquées par l'effet des stériles miniers qui sont situés à quelques mètres sur les berges et sur le parcours de l'oued Moulouya, très riches en Pb, Zn, Cu et en As. Ces résidus miniers sont générés par une activité minière abandonnée dans la haute Moulouya sans réhabilitation, et elles se présentent sous forme de haldes et de terrils, chacun d'eux renferme des quantités importantes de stériles riches en ETM susceptibles d'être entraînés vers les eaux de surface et les sédiments d'oued Moulouya.

Ainsi, l'évolution longitudinale de cette contamination se caractérise par un net gradient croissant jusqu'à la station S3 où les teneurs en Pb, Zn, Cu et en As sont anormalement élevées. Plus en aval, la situation s'améliore progressivement et se traduit par une baisse des teneurs métalliques, grâce à la retenue du barrage qui réduit les quantités des matières en suspension, et toutes les particules sur les quelles sont piégés les éléments métalliques en provenance des sites miniers. Mais, la situation se détériore de nouveau, suite à l'importance charge polluante rejetée par les villes avoisinantes de l'oued. En effet, les teneurs relativement élevées en Pb, Zn et en Cu au niveau des stations S8, S10, S11 et S13, peuvent être le résultat des rejets urbains générés respectivement par des villes de Missour, Outat El Haj, Tindit et Guercif. Ces rejets liquides, sont très chargés en matière organique support privilégié des métaux engendrant la formation de complexe organométallique plus ou moins stables. Ces constatations rejoignent celles de *Lauenstein et Dolvin* [26] qui rapportent que le Cu, Pb, et le Zn sont des métaux caractéristiques de la pollution de type urbaine.

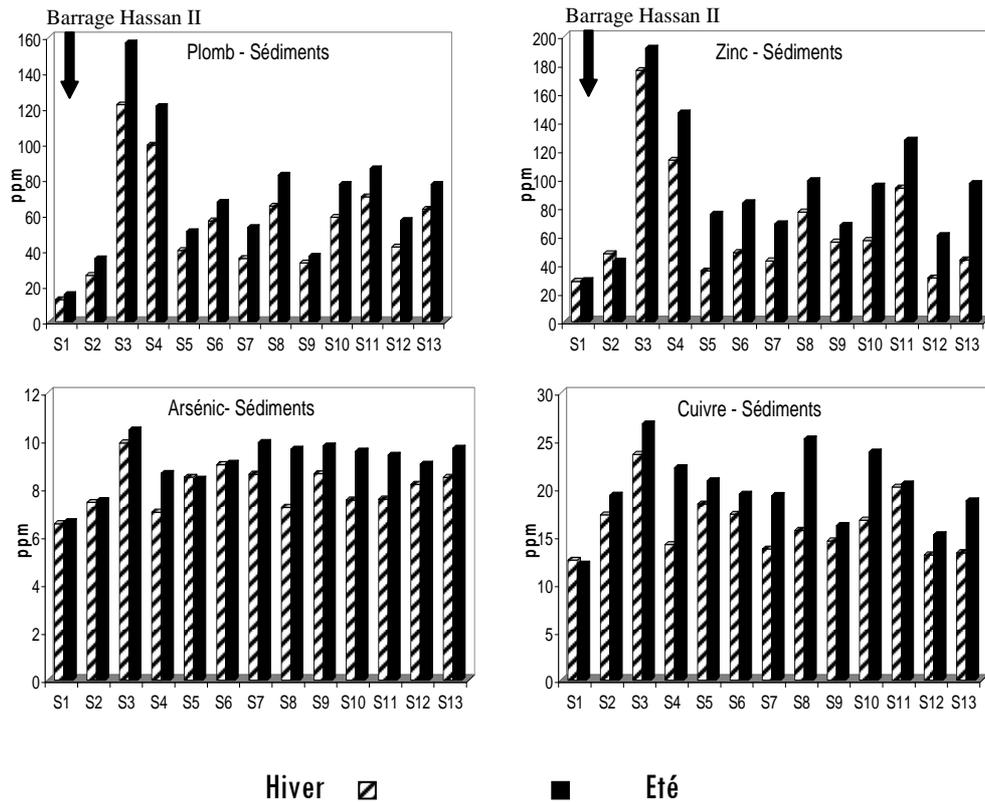


Figure 6 : Variation spatio-temporelle de la teneur moyenne des éléments traces métalliques (ppm) dans les sédiments de l'oued Moulouya

En outre, l'augmentation légère des teneurs en Zn et en Pb, constatée au niveau de la station S6 en comparaison avec la station S5, peut être liée probablement à l'existence en amont de la station S6, d'une unité de production de Ghassoul dont les rejets contribuent à l'accumulation des éléments traces dans les sédiments de l'oued Moulouya. En effet, les résultats de l'analyse de cet élément saponifière (Ghassoul) présentent des teneurs de 7,08 ppm pour le Pb et 19,94 ppm pour le Zn.

Pour ce qui est de l'évolution temporelle, les métaux étudiés As, Pb, Zn, Cu et Cd suivent en général les mêmes variations saisonnières au sein d'une même station, avec une légère augmentation des teneurs de tous ces éléments pendant la période sèche où le potentiel hydrique de Moulouya et de ses affluents est très faible, mais, le débit de rejets urbains reste constant. Ceci augmente par conséquent la concentration de polluants à tous les niveaux. une exception est à relever, dans le cas du Cd au niveau de la station S10 où on observe un pic relativement important, pendant la saison pluviale, dû probablement à un apport ponctuel et occasionnel véhiculé par les rejets urbains de la ville d'Outat El Haj.

Cette différence de concentrations des métaux entre la période sèche et la période de pluie, s'explique par le fait que pendant la période hivernale, les crues entraînent une augmentation du débit et par conséquent celle de la turbulence du milieu suite à une remise en suspension des matériaux fins, pouvant être à l'origine d'une décontamination métallique des sédiments. Comme, elle pourrait être due aussi aux phénomènes de dilution qui s'opèrent par des apports des sédiments moins ou non contaminés, émanant des affluents de l'oued Moulouya. A l'inverse, pendant la période estivale, la décantation et le piégeage dans les sédiments d'éléments minéraux apportés par les rejets, sont facilités dans un milieu de faible

hydrodynamisme par la matière organique qui contribue à la formation de complexe et à la fixation des métaux sur les sédiments [27].

Par ailleurs, le pH joue un rôle important dans l'adsorption des métaux. En effet, un pH alcalin limite le passage des métaux lourds de la phase solide à la phase aqueuse [28]. Notre zone d'étude montre un pH qui varie entre 7,04 et 7,89, induit systématiquement une augmentation du taux d'adsorption des éléments traces dans les sédiments superficiels d'oued Moulouya. Mais le piégeage de ces métaux lourds dans les sédiments n'est pas forcément définitif. Les risques de remobilisation, de biodisponibilité et donc de la toxicité sont à craindre, et ils constituent un danger permanent pour tout l'écosystème aquatique, lorsque les conditions physico-chimiques le permettent [29], notamment pour toute la chaîne trophique [30].

En outre, l'interprétation et l'évaluation de la contamination d'un sédiment reste tributaires d'une connaissance parfaite des teneurs de référence, difficile à établir en raison de leur grande hétérogénéité liée aux facteurs géochimiques et lithologiques des sédiments [31]. A ces facteurs s'ajoutent les disparités dues aux méthodes analytiques préconisées. Par ailleurs, les teneurs de référence doivent être établies à l'échelle régionale sur un site dépourvu de toute pollution anthropique [32].

[31] évaluent le degré de contamination d'un sédiment par comparaison aux valeurs de référence, en calculant pour chaque site donné et par métal, un indice de contamination (I_c) :

$$I_c = \text{teneur du métal} / \text{teneur de référence} \quad (1)$$

$$\text{L'indice moyen (Imc)} : I_{mc} = \sum I_c / n \quad (n \text{ étant le nombre d'éléments analysés}) \quad (2)$$

Dans la présente étude, c'est la station S1 qui a été retenue comme site de référence compte tenu de sa localisation, loin de toute perturbation d'origine anthropique et de ses faibles teneurs en métaux si on la compare à celles mesurées au niveau des autres stations.

En absence de l'estimation de la teneur de la matière organique dans les sédiments, l'indice de contamination I_c est défini comme étant le rapport de la teneur du métal au niveau d'un site donné sur la teneur du métal au niveau du site de référence (S1).

L'ensemble des sites présente un I_c supérieur à 1 et ceci pour l'ensemble des métaux étudiés. Ces indices témoignent d'un apport dû principalement aux activités humaines [33]. La comparaison de la classification des stations selon leur indice moyen de contamination I_{mc} dégage l'ordre décroissant de contamination suivant :

$I_{mcS10} > I_{mcS3} > I_{mcS4} > I_{mcS11} > I_{mcS8} > I_{mcS13} > I_{mcS6} > I_{mcS2} > I_{mcS12} > I_{mcS9} > I_{mcS5} > I_{mcS7} > I_{mcS1}$,

pour la saison hivernale alors que pour la saison estivale la classification est la suivante :

$I_{mcS3} > I_{mcS4} > I_{mcS11} > I_{mcS8} > I_{mcS13} > I_{mcS10} > I_{mcS6} > I_{mcS5} > I_{mcS7} > I_{mcS12} > I_{mcS9} > I_{mcS2} > I_{mcS1}$.

Mais cette classification ne suit pas la distribution longitudinale des stations et elle permet de distinguer trois classes d'importance pendant la saison estivale :

-classe 1 dont l' I_{mc} est compris entre 0 et 4. Elle regroupe les stations : S1, S2, S5, S7, S9 et S12

-classe 2 dont l' I_{mc} est compris entre 4 et 7, regroupe les stations : S6, S8, S10, S11, et S13

-classe 3 dont l' I_{mc} est supérieure à 7, regroupe les stations : S3 et S4

Et trois autres classes pendant la saison hivernale :

-classe 1 dont l' I_{mc} est compris entre 0 et 4. Elle regroupe les stations : S1, S2, S5, S7, S9 et S12

-classe 2 dont l' I_{mc} est compris entre 4 et 7, regroupe les stations : S6, S8, S11 et S13

-classe 3 dont l' I_{mc} est supérieure à 7, regroupe les stations : S3, S4 et S10.

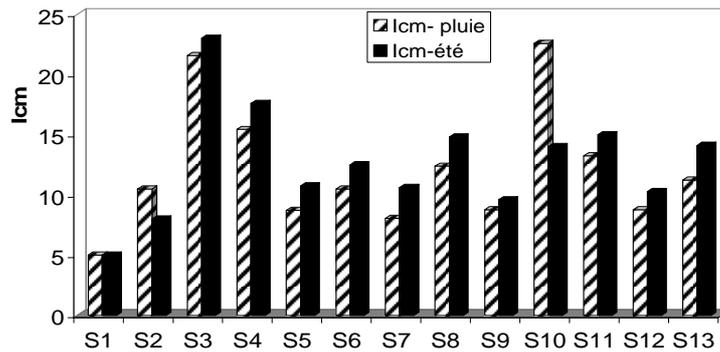


Figure 7 : Évolution spatio-temporelle de l'indice de contamination moyen Imc

L'analyse de cette contamination basée sur les Ic spécifiques à chaque métal, confirme les premières observations (**Figure 7**), et révèle une contamination métallique accentuée pour le Pb et le Zn). Selon [34], les stations d'étude qui indiquent une forte contamination métallique des sédiments superficiels sont celles qui montrent des Imc supérieurs à 4 ($Imc > 4$). En effet, les stations les plus affectées sont S3 et S4 situées en aval des districts miniers d'Aouli- Mibladen et de Zaida et la station S10 en aval des rejets urbains d'Outat EL Haj qui draine une teneur importante en Cd en période de pluie ; à moindre degré les stations S8, S11 et S13 situées en aval des points de rejets urbains et la Station S6 en aval de l'unité de Ghassoul puis les autres stations (S1, S2, S5, S7, S9 et S12) mais de moindre importance.

Cette situation est imputable au stériles miniers, générés par les activités minières abandonnées sans réhabilitation, très riches en ETM, et aux rejets domestiques très chargés en matière organique, support idéal à la complexation des métaux au niveau des sédiments. A ceci s'ajoutent probablement les apports latéraux par les eaux de ruissellement principalement en période de traitements phytosanitaires ainsi que des lixiviats des décharges publiques des villes de Midelt, Missouri, Outat El Haj et celle de Guercif et qui sont implantées d'une manière anarchique soit sur les rives de l'oued ou à une centaine de mètre par rapport au cours d'eau.

La pollution observée dans les sédiments au niveau des stations situées en aval du barrage, pourrait aussi avoir comme origine, les polluants résultant des résidus miniers de la haute Moulouya avant la construction du Barrage Hassan II. En effet, les matières en suspension et les matériaux solides sur lesquelles sont piégés les métaux sont transportés par le cours d'eau, et sont déposés dans les zones calmes du fait du ralentissement de l'eau. Avec les crues, les sédiments riches en élément, progressent lentement dans le cours d'eau vers l'aval. Les quantités concernées dépendent à la fois des conditions climatiques, de la taille des particules, de la vitesse d'érosion et du lieu de stockage des éléments considérés.

Les résultats montrent aussi que les teneurs observées dans la phase sédiment sont importantes par rapport à celles observées dans la phase dissoute dans les différentes stations étudiées, à l'exception de l'As dans les stations S3 et S4 où les teneurs en sédiments sont inférieures à celles enregistrées dans l'eau. En effet, les sédiments sont souvent considérés comme un lieu d'accumulation des métaux lourds dans l'environnement aquatique [35-36], ils servent non seulement comme un vecteur du transport des polluants, mais aussi comme lieu de stockage et d'accumulation, et constitue une source interne des métaux susceptibles de libérer les éléments traces déposés au moindre changement des conditions du milieu [37].

Par ailleurs, la comparaison des teneurs en Pb, Zn, Cu, et en Cd avec les normes internationales et les teneurs naturelles rapportées par le Service Géologique – Alsace [38,39] révèle que : l'analyse du Pb dans les sédiments superficiels montre des teneurs élevées, qui fluctuent entre un minimum de 33,13ppm en S9

et un maximum de 156,72ppm en S13, dépassant largement la norme fixée à 22ppm; de même pour le zinc, il montre une certaine ressemblance dans sa variation et leurs teneurs fluctuent entre 93,43 et 191.62ppm, respectivement en S11 et en S3, et qui dépasse de loin la norme fixée à 88ppm. Pour le Cu, on note une certaine homogénéisation pour l'ensemble des stations avec une surcharge au niveau de certaines stations en période estivale (S3, S8 et S10), mais ces valeurs restent en dessous des normes à l'exception de la station S3 qui présente une teneur de 26,75ppm légèrement supérieure à la norme fixée à 26ppm ; le Cd quand à lui ne montre pas des teneurs élevées à l'exception de la station S10 où on a enregistré 1,86ppm qui dépassent légèrement la norme internationale fixée à 1,8ppm.

Aussi, les teneurs en As ont presque les mêmes valeurs pendant les deux périodes, elles varient entre 6,53 et 10,44ppm dans les sédiments superficiels avec une concentration maximale de 10,44ppm à la station S3 qui est générée soit par les résidus miniers soit dépendant de la géologie de la région. Mais, ces concentrations restent inférieures à la moyenne mondiale des sédiments des rivières, et qui sont de 50 ppm [40].

4. Conclusion

En vue de déterminer l'impact de la pollution des déchets miniers résultant de l'ancienne mine, localisée dans la haute Moulouya, sur les composantes eau et sédiments de l'oued Moulouya, une étude physico-chimique et une évaluation de la pollution métallique par l'As, Pb, Zn, Cu et Cd a été effectuée sur les eaux de surface et les sédiments superficiels de l'oued Moulouya, prélevés en période de pluie et en période sèche.

L'étude a permis de mettre en relief que l'oued Moulouya qui draine les sites miniers d'Aouli, Mibladen et zaida est un exemple représentatif du transfert des métaux à partir des sites miniers abandonnés. Le transfert des polluants métalliques à partir de ces sites fournit une indication sur la destinée et le partage des métaux dans l'environnement. En effet, le suivi des teneurs métalliques dans les sédiments superficiels d'oued Moulouya révèle une nette contamination métallique, accentuée par le Plomb et le Zinc et marquée par des variations saisonnières et spatiales. L'évaluation du degré de contamination par l'utilisation de l'indice de contamination(Ic) nous confirme l'importance de la contamination des sédiments par ces deux éléments pendant la période pluvieuse et la période sèche, principalement en aval du district minier. Néanmoins, la mise en place du barrage HassanII a diminué les capacités de l'oued à évacuer les polluants vers l'aval car la dynamique fluviale est devenue très faible.

Par ailleurs, la comparaison des teneurs en éléments métalliques dans les sédiments superficiels d'oued Moulouya entre l'amont et l'aval du Barrage Hassan II et avec celles des travaux antérieurs, indique l'existence d'un apport métallique ancien. Ceci ne peut être attribué qu'au lessivage et ruissellement des digues stériles, par les fortes pluies et les vents, résultant de l'ancienne mine de Pb – Zn. Le district minier reste donc la source principale de cette pollution sans toute fois exclure celle d'origine urbaine, naturelle et agricole.

Cependant, la comparaison des teneurs enregistrées dans les eaux de surface de l'oued Moulouya avec les normes marocaines des eaux de surface montre que ces eaux, sont de qualité globalement excellente à moyenne. Il en résulte que les sédiments superficiels de l'oued Moulouya constituent le réservoir pour ces polluants susceptibles de les relarguer au moindre changement de conditions physico-chimiques du milieu. Cette étude a montré également, l'effet néfaste du centre minier de Zaida abandonné sans réhabilitation dans la haute Moulouya, non seulement sur les eaux et les sédiments dans le bassin de Moulouya, mais aussi sur l'esthétique de l'environnement dans la région. La préservation des ressources hydriques devient donc impérative, devant la dégradation des écosystèmes aquatiques et exige la mise en état des sites. La

restauration de ces sites, repose sur la végétalisation des dépôts de déchets miniers avec des espèces qui poussent naturellement dans la région, par exemple l'alfa (*Stipa naricissima*), et le remblayage des excavations avec des matériaux chimiquement inertes.

Références

- [1] - A. WADJINI, "Le plomb au Maroc : cas des districts de Touissit et de Jbel Aouam", *Chron. Rech. Min.*, 531/532 (1998) 9-28.
- [2] - J. M. SCHMITT, "Sédimentation, paléo-altération, géochimie et minéralisation en plomb de la série triasique de Zaida (Haute Moulouya, Maroc)". Thèse, École sup. *Mines Paris*, (1976) 104p.
- [3] - B. D. DAVIES et R. C. BALLINGER, "Heavy metals in soils In north Somerset, England, With special reference to contamination from base metal mining in the Mendips", *Environ. Geochem. Health*, 12 (1990) 291-300.
- [4] - M. C. JUNG, "Heavy metal contamination of soils and waters in and around the Imcheon Au - Ag mine, Korea ". *Appl. Geochem*, 16 (2001) 1369-1375.
- [5] - A. BOUABDLI, N. SAÏDI, S. M'RABET, Escarre et M. Leblanc, "Oued Moulouya : vecteur de transport des métaux lourds (Maroc)". *Rev. Sci. Eau*, 18(2005) 199-213.
- [6] - A. EMBERGER, "Introduction à l'étude des minéralisations plombifères de la haute Moulouya. Colloque sur les gîtes stratiformes", *Notes et M. Serv. Géol. Maroc*, 181 (1965) 167-174.
- [7] - M. COMBE et M. SIMONOT, "La Haute Moulouya, le sillon d'Izter- Enjil et le massif de Bou-Mia- Aouli", *Notes et Mémoires. Service Géologique. Maroc*, 231 (1971a) 193-201.
- [8] - M. COMBE et M. SIMONOT "La Moyenne Moulouya". *Notes et Mémoires. Service Géologique. Maroc* (1971b) 231.
- [9] - D. BELGHYTI, "Étude de cadrage de la biodiversité du bassin versant de la Moulouya et recensement des activités polluantes". *ENDA Maghreb*, (2004) p.44.
- [10] - J. F. CHIFFOLEAU et I. TRUQUET, "Nouvelles méthodes de dosage de quelques métaux traces dans les sédiments et les matières en suspension", *Rapp. IFREMER*, 08 (1994).
- [11] - D. AUGER, " Méthode de dosage du cadmium, du cuivre, du plomb et du zinc dan les milieux biologiques". *Rapp. Direction Environnement recherches Océaniques (Dero)*, (1989) 07-MB.
- [12] - M. BOUACHRINE, M. FEKHAOUI, L. BENNASSER and L. IDRISSE, "Distribution of selected metals in tissue samples of fish from industrially contaminated stream (the river Sebou, Morocco)". *Acta hydrobiol*, 40 (1998) 173-179.
- [13] - J. RODIER, "Analyse de l'eau: eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer". 7^{ème} édition, Dunot, Paris (1984).
- [14] - M. L. EL HACHIMI, M. EL HANBALI, M. FEKHAOUI, A. BOUABDLI, L. EL FOUNTI et N. SAÏDI, "Impact d'un site minier abandonné sur l'environnement : cas de la mine de Zaida (haute Moulouya, Maroc)", *Bulletin de l'institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*, 27 (2005) 93-100.
- [15] - B. SERPAUD, M. AL SHUKRY, M. CASTEIGNEAU et G. MATEJKA, "Adsorption des métaux lourds (Cu, Zn, Cd et Pb) par les sédiments superficiels d'un cours d'eau: rôle du pH, de la température et de la composition du sédiment", *Revue des sciences de l'eau*, 7(1994) 343-365.
- [16] - J. LIONS, "Étude hydrogéochimique de la mobilité de polluants inorganiques dans des sédiments de curage mis en dépôt: expérimentations, études in situ et modélisation", Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des mines de Paris. (2004) France.
- [17] - N. M. "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. *Bull. Off.* n°5062 du 30 ramadan 1423 (5-12-2002).
- [18] - R. ECH-CHOKRI, "Contrôle géochimique des éléments majeurs et en traces dans le bassin versant de la Moulouya", D.E.S.A. Faculté des Sciences, Kénitra, (2000) 120pp.
- [19] - A. BOUABDI, N. SAÏDI, L. EL FOUNTI et M. LEBLANC, "Impact de la mine d'Aouli sur les eaux et les sédiments de l'oued Moulouya (Maroc)". *Bull. Soc. Hist. nat. Toulouse*, 140 (2004) 27-33.
- [20] - H. J. M. BOWEN, "Environmental chemistry of the elements". *Academic press, New York*(1979) 49-62.
- [21] - K. H. WEDEPOHL, "Zinc in handbook of geochemistry", Executive edit. Wedepohl, Springer Verlag, Berlin, Section 30, (1972) *B: O*.
- [22] - R. J. GIBBS, "Transport phases of transition metals in the Amazon and Yukon rivers". *Geol. Soc. Am. Bull*, 88(1977) 829 - 843.
- [23] - E. A. BOYLE, "Trace element geochemistry of the Amazon and tributaries", *Spring Meeting, AGU, EOS*, 59 (1978) 276 p.
- [24] - E. A. BOYLE et J. M. EDMOND, "Copper in surface waters south of New Zealand", *Nature*, vol. 253 (1976) 107-109.
- [25] - C. CASIOT, "Développement de techniques analytiques couplées (HPLC-ICP-MS et EC- ICP-MS) pour la spéciation de métalloïdes (Arsenic, Sélénium, Antimoine et Tellure)". Thèse, Univ. Pau, France, (1999) 185p.
- [26] - G. G. LAUENSTEIN and S. S. DOLVIN, "Mollusk monitoring of United State coastal and estuaire environments. *Anaasis magazine*, V. 20, n°06 (1992).
- [27] - J. M. GODFRIN et R. V. BLADEL, "Influence du pH sur l'adsorption du cuivre et du zinc par les sols", *Sci. Du sol*, 28(1)(1990) 15-26.
- [28] - I. THORNTON, "Risk assessment related to metals: the role of the geochemist. Report of the International Wordshop on Risk Assessment of Metals and their Inorganic Compound", *International Council on Metals and the Environment*, Angers, France, November 1996.
- [29] - M. FRANÇOIS, D. LI, H. C. DUBOURGUIER et F. DOUAY, "Facteurs déterminants de la mobilité des métaux (Pb, Cd et Zn) dans les sols contaminés auteur de deux usines métallurgiques du Nord de la France". Journées Nationales de l'étude des sols, 22-24 octobre 2002, Orléans.
- [30] - F. FADIL, A. MAAROUF et A. ZAID, "Utilisation de *Gammarus gauthiéri* pour tester la toxicité des sédiments des eaux douces". *Limnol*, 32 (1997) 73-78.
- [31] - R. BELAMIE et S. PHELIPPOT, "Étude du niveau de contamination des sédiments de plusieurs cours d'eau du bassin parisien par les métaux et les composées organochlorés". CEMAGREF, division qualité des eaux, pêche et pisciculture, *Rap.* 16 (1982) 1-8.
- [32] - D. BOUST, J. M. JOUANNEAU et C. LATOUCHE, "Méthodologie d'interprétation des teneurs totales en métaux traces contenus dans les sédiments estuariens et littoraux", *Bul.Inst. Géol. Bassin d'aquitaine*, 30 (1981) 71-86.
- [33] - M. O. ANGELIDIS and M. ALOUPI, "Metals in sediments of Rhodes harbour, Greece", *Mar. Pollt. Bull.*, 31 (4-12)(1995) 273-276.
- [34] - H. NASSALI, H. BENBOIUH, A. SRHIRI, A. HAFIANE et M. DHAHBI, "Impact des rejets sur la qualité métallique des eaux d'un lac naturel: Merja Fouarate à Kénitra au Maroc", *Phys. Chem. News* 3 (2001) 89-97.
- [35] - S. N. LUOMA, "Can we determine the biological availability of sediment-bound trace elements?" *Hydrobiolol*, 176/177 (1989) 379-396.
- [36] - D. COUILLARD, "Qualité des sédiments en suspension et de fond du système Saint-Laurent (Canada)", *Hydro. Sci. J*, 32 (1987) 445-467.

- [37] - N. FAUCON, "Fixation des métaux lourds (Plomb et Cadmium) sur deux sédiments côtiers : estuaire de la Canche, port de Dunkerque. Influence du pH et du potentiel d'oxydo-reduction". Thèse, Univ. Sci. Tech. Langue doc, Montpellier, France (1987) 219p.
- [38] - Service Géologique Régional Alsace, "Inventaire du degré de pollution des sédiments des cours d'eau", Bureau de recherches Géologiques et Minières (1982).
- [39] - J. M. MARTIN and M. MEYBECK, "Elemental mass-balance of material carried by major world rivers", *Marine chemistry*, 7(3) (1979) 173-206.
- [40] - J. M. MARTIN and M. WHITFIELD, "The significance of the river input of chemical elements to the ocean", In: P. L. Smedley and D. G. Kinniburgh (eds.) – A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters, *Appl. Geochem*, 17 (1983) 517-568.