



*Master Sciences et Techniques*  
*Eau et Environnement*



**Mémoire de Stage de Fin d'Etudes**

**Etude de la contamination par les éléments traces  
métalliques des sédiments de l'oued Moulouya et de la  
retenue du barrage Hassan II en aval de la mine  
abandonnée Zeïda, Haute Moulouya**

Par :

**Abdellah Elazhari**

Soutenu le 29 juin 2013 devant le jury :

<b>Pr. A. Rhoujjati</b>	<b>FSTG -Marrakech</b>	<b>Encadrant</b>
<b>Pr. M.L. El Hachimi</b>	<b>CRMEF - Rabat</b>	<b>Encadrant externe</b>
<b>Pr. R. Hakkou</b>	<b>FSTG - Marrakech</b>	<b>Examineur</b>
<b>Pr. A. Boularbah</b>	<b>FSTG - Marrakech</b>	<b>Examineur</b>

**2012/2013**

# **Dédicaces**

**A la mémoire de mon Grand frère Taha, même mort si jeune  
a toujours constitué une grande source d'inspiration**

**A ma chère Mère qui a éclairé mon chemin et qui m'a encouragé et soutenue tout au  
long de mes études ;**

**A mon père pour son encouragement continu ;**

**A mes chères frères : Abderrahmane, Ismail, et l'unique sœur fatimazehra ;**

**A ma fiancée Makarim que je remercie infiniment  
pour son aide et sa présence le long du chemin ;**

**A toute la famille El Azhari et la famille Amor ;**

**A tous mes amis**

**si nombreux que je ne pourrais tous les citer ;**

**Enfin, je dédie ce travail à tous les citoyens de la commune de Zeïda  
pour leur gentillesse, leur coopérativité  
et leur attachement à leur cause.**

## Remerciements

Pendant la rédaction de ce manuscrit j'ai imaginé maintes et maintes fois ce que je voulais dire pour remercier toutes les personnes (nombreuses) qui ont contribué à la réussite de ce projet.

Evidemment maintenant que c'est le moment, je ne sais plus par où commencer...

Au préalable, je tiens à remercier mon encadrent **Moulay Laârobi EL Hachimi**, d'avoir proposé un sujet aussi intéressant, et de m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce projet dans les meilleurs conditions possibles, de son aide judicieuse, et de son suivi continu, malgré la distance.

Mr **Rhoujjati Ali**, d'avoir joué le rôle du professeur, et du bon père, de ses précieux conseils, toujours au bon moment ! Pour sa présence quotidienne et sa participation effective au déroulement du stage.

Je remercie également le professeur **Rachid Hakkou**, pour sa vision critique, et ses conseils précis, tant que précieux, mais aussi, de m'avoir permis de réaliser la majorité des analyses au LCME, et pour son aide continu durant le stage.

Enfin je remercie mes amis, **Soufyane, Adil et Youssef**, pour m'avoir soutenue le long de ce travail.

## Résumé

# Etude de la contamination par les éléments traces métalliques des sédiments de l'oued Moulouya et de la retenue du barrage Hassan II en aval de la mine abandonnée Zeïda, Haute Moulouya

Le district minier plombifère de la Haute Moulouya, comportant les mines Zeïda, Aouli-Mibladen, constituait le plus gros gisement plombifère du Maroc.

La mine de Zeïda, comme il est le cas pour Aouli et Mibladen et plusieurs mines à travers le Maroc, est abandonnée sans réhabilitation ni suivi d'impact sur l'environnement.

Afin de déterminer le degré de contamination des sédiments par les éléments traces métalliques au voisinage de la mine de Zeïda, des échantillons de sédiments de surfaces ont été prélevés le long l'Oued Moulouya au allentour de la mine Zeïda, dans son affluent Ansegmir, et du barrage Hassan II en aval de la mine. Ces sédiments ont été analysés en particulier pour les éléments traces métalliques.

Les résultats d'analyses ont permis de mettre en évidence une contamination accentuée par le plomb. En effet, cet élément est présent à de très fortes teneurs, avec une teneur maximale de 11 200 ppm pour les échantillons prélevés dans l'oued Moulouya au voisinage des verses à résidus de traitement. Les valeurs extrêmement élevées dépassant de loin les teneurs normales des ETM dans les sédiments fluviaux marocains et celles enregistrées dans d'autres fleuves mondiaux.

Les stations en aval du centre minier présentent toutes des teneurs élevées en plomb, cependant, ces teneurs s'atténuent vers le barrage, tout en restant pourtant assez élevées comparées aux teneurs normales.

L'arsenic constitue le deuxième élément métallique le plus abondant dans les sédiments étudiés, la teneur maximale (390 ppm) est atteinte pour les sédiments de l'affluent Ansegmir, ce qui laisse penser pour l'arsenic à une autre source de pollution affectant la région, autre que la source minière.

Le zinc présente des teneurs moyennes proches des teneurs normales, tandis que le cuivre ne dépasse pas les teneurs enregistrées dans d'autres fleuves.

Les résultats de l'étude ont permis d'identifier la source de contamination, il s'agit de la source minière en particulier les résidus miniers de traitement abandonnés sans réhabilitation considérés comme principale source de pollution par les éléments traces métalliques des sédiments avoisinants. Les sédiments constituent une réserve importante de polluants dans l'environnement.

**Mots clés :** Sédiments, résidus miniers, éléments traces métalliques, oued Moulouya, Barrage Hassan II, mine Zeïda, Haute Moulouya.

## Abstract

# Study of contamination by trace metals in sediments of the river Moulouya and of the dam Hassan II downstream of the abandoned Zeïda mine, High Moulouya

The mining district of lead in the High Moulouya featuring Zeïda, Aouli-Mibladen mines, was the big deposit of lead in Morocco.

Zeïda mine, as is the case for Aouli and Mibladen and several mines across Morocco, is abandoned without rehabilitation or monitoring of environmental impact.

To determine the extent of sediment contamination by trace metals at the vicinity of the Zeïda mine, sediment samples were collected from areas along the river Moulouya near the Zeïda mine, in its tributary Ansegmir and Hassan II dam downstream the mine. These sediments were analyzed in particular for trace metals.

The results of analyzes highlight a pronounced contamination by lead. In fact, this element is present at very high levels, with a maximum value of 11 200 ppm for sample taken in the vicinity of tailings verses. The extremely high values far exceeding the normal levels of TEM in Moroccan river sediments and those recorded in other global rivers.

Stations downstream of the mining center all have high levels of lead, however, these levels subside towards the dam, while remaining relatively high compared to normal levels.

Arsenic is the second most abundant metallic element in sediments studied, the maximum level (390 ppm) is reached in the sediments of the tributary Ansegmir, suggesting for the arsenic at another source of pollution in the area, other than mining source.

Zinc has average levels close to normal levels, while copper does not exceed the levels recorded in other rivers.

The results of the study helped to identify the source of contamination, it is the mining source in particular tailings verses abandoned without rehabilitation considered as the main source of pollution by trace metals in sediments nearby. The sediments are an important subject of pollutants into the environment.

**Keywords:** sediments, tailings, trace metals, river Moulouya, Dam Hassan II, Zeïda mine, High Moulouya.

## Liste des figures

<b>Figure 1</b> : Métaux lourds dans la classification périodique -----	20
<b>Figure.2</b> : Diagrammes de prédominances pH/pE : (A) Cadmium, (B) Plomb, (C) Zin et du Cuivre (D)-----	26
<b>Figure.3</b> : Diagramme de prédominance pH/pE de l'arsenic -----	27
<b>Figure.4</b> : Modèle conceptuel du cycle des métaux traces dans les eaux de surface et les sédiments côtiers, présenté en tenant compte des principaux supports de ces métaux (les oxydes de Fe et de Mn et les sulfures) -----	29
<b>Figure.5</b> : Localisation géographique de la zone d'étude -----	42
<b>Figure.6</b> : Carte géologique schématique de la Haute Moulouya et ses bordures atlasiques -	43
<b>Figure. 7</b> : Log stratigraphique synthétique de la Haute Moulouya et ses bordures atlasiques -----	45
<b>Figure.9</b> : Répartitions de pluies interannuelles et du total annuel à la station de Zeïda et d'Ansegmir durant la période 1980-2000 -----	47
<b>Figure. 9</b> : Le réseau hydrographique de la haute Moulouya réalisé à base d'MNT -----	48
<b>Figure.10</b> : Répartition des débits moyens mensuelles interannuelles (m <sup>3</sup> /s) entre 1980 et 2000 à la station Zeïda et Ansegmir -----	49
<b>Figure.11</b> : Situation géographique des mines de la haute Moulouya -----	52
<b>Figure.12</b> : Production réalisée aux centres miniers Aouli-Mibladen de 1968 à 1983 -----	53
<b>Figure.13</b> : Teneurs en Pb de la Production réalisée au centre minier de Zeïda durant la période 1973-1985 -----	54
<b>Figure.14</b> : Coupe type d'un panneau minéralisé à Zeïda -----	55
<b>Figure.15</b> : Situation géographique des sites de prélèvements au niveau de l'Oued Moulouya -----	59
<b>Figure.16</b> Schéma illustrant la méthode de mesure au granulomètre laser -----	62
<b>Figure. 17</b> : Répartition des fractions granulométriques (%) durant la période pluvieuse ----	70
<b>Figure. 18</b> : Répartition des fractions granulométrique (%) durant la période sèche -----	71
<b>Figure. 19</b> : Variation spatio-temporelle de la matière organique -----	72
<b>Figure. 20</b> : Variation spatio-temporelle des teneurs en carbonates -----	72
<b>Figure. 21</b> : Variation spatio-temporelle du pH -----	73
<b>Figure. 22</b> : Variation spatio-temporelle de la conductivité -----	74
<b>Figure. 23</b> : Variation spatiale des teneurs en soufre total -----	75
<b>Figure. 24</b> : Variations des teneurs en Pb dans les sédiments des stations étudiées -----	76
<b>Figure 25</b> : Variations des teneurs en Cu dans les sédiments étudiés. -----	77
<b>Figure. 26</b> : Variation spatiale des teneurs en As dans les sédiments de l'oued Moulouya superficiels -----	77
<b>Figure. 27</b> : Variation spatiale des teneurs en Zn dans les sédiments étudiés. -----	78
<b>Figure. 28</b> : Variation spatiale en plomb -----	80
<b>Figure. 29</b> : Variation spatiale en arsenic -----	81
<b>Figure. 30</b> : Variation spatiale en cuivre -----	82
<b>Figure. 31</b> : Variation spatiale en zinc -----	83
<b>Figure. 32</b> : Cartographie des indices de contaminations moyens -----	85
<b>Figure. 33</b> : Représentation des résultats d'analyse en composantes principales pour les sédiments -----	88

**Figure. 35** : carte de la répartition des éléments traces métalliques (Pb, Cu, As et Zn) dans les sédiments de surface ----- 92

## Lise des tableaux

<b>Tableau. 1 :</b> Différents types de pollution.....	17
<b>Tableau.2 :</b> Toxicité des éléments étudiés.....	22
<b>Tableau. 3 :</b> pH de relargage des ETM .....	32
<b>Tableau. 4 :</b> Composition granulométrique des résidus miniers de traitement de Zeïda .....	57
<b>Tableau.5 :</b> minéralogie des résidus miniers de traitement de Zeïda (Wt % = weight percent) .....	57
<b>Tableau.6 :</b> Teneurs moyennes en ETM des résidus de traitement (ppm) .....	57
<b>Tableau.7 :</b> Sites de prélèvements des sédiments.....	60
<b>Tableau. 8 :</b> Minéraux dominants dans les sédiments de surface de l'oued Moulouya .....	68
<b>Tableau. 9 :</b> Minéraux dominants dans les sédiments de surface des affluents .....	68
<b>Tableau. 10 :</b> Minéraux dominants dans les sédiments de surface du barrage Hassan II .....	68
<b>Tableau. 11 :</b> Variations spatiales des indices de contamination (IC) .....	84
<b>Tableau. 12 :</b> Teneurs en métaux totaux et substrats .....	86
<b>Tableau. 13 :</b> Matrice de corrélations entre les métaux des sédiments et les paramètres physicochimiques mesurés .....	86
<b>Tableau. 14 :</b> Teneurs des éléments métalliques (ppm) rapportées dans la littérature pour des sédiments de cours d'eau.....	89
<b>Tableau. 15 :</b> Comparaison des teneurs moyenne avec les teneurs naturelles du plomb, cuivre, arsenic et du zinc .....	90

## Lise des photos

<b>Photo. 1 :</b> dépôt noirâtre (Plomb) visible sur les sédiments fluviaux .....	24
<b>Photo. 2 :</b> Lacs de carrière .....	50
<b>Photo. 3 :</b> Barrage Hassan II.....	50
<b>Photo. 4 :</b> Résidus de décapage à proximité .....	56
<b>Photo. 5 :</b> Résidus de traitement stockés .....	56
<b>Photo. 6 :</b> L'appareil Carbon/Sulfur Determinator.....	63

# Sommaire

Dédicaces	2
Remerciements	3
Résumé	4
Abstract	5
Liste des figures	6
Liste des tableaux	8
Liste des photos	8
Introduction générale	12

## Chapitre I : Etude bibliographique

I. Généralités sur la pollution des eaux et des sédiments	15
I.1. Les sources de pollution des eaux et sédiments	15
I.2. Les différentes formes de pollution des eaux et des sédiments	17
I.3. Les différents types de pollution	17
I.4. Les paramètres caractéristiques de la pollution	18
II. Les éléments traces métalliques (Pb, Zn, Cu, Cd, As) dans les sédiments.	19
II.1. Les sédiments	19
II.2. Généralités sur les éléments traces métalliques	19
II.3. Sources des métaux dans les sédiments de surface	20
II.4. Géochimie du Pb, Zn, Cu, Cd et As	23
II.5. Comportement, accumulation et relargage	28
II.6. Teneurs	33
III. Exploitation minière et impacts sur l'environnement	34
III.1. Introduction	34
III.2. Les types d'exploitations minières	34
III.2.1. Mine souterraine	34
III.2.2. Exploitation de surface	34
III.3. Phases et opérations d'exploitation	35
III.3.1. Prospection	35
III.3.2. Développement	35
III.3.3. Construction de routes d'accès	35
III.3.4. Préparation et déblaiement du site	36
III.3.5. Extraction du minerai	36

III.3.6. Evacuation des résidus -----	36
III.4. Notion d'impact sur l'environnement -----	36
III.5. Les impacts de l'exploitation minière sur l'environnement -----	37
III.6. Impacts sur les ressources en eaux-----	37
<b>Chapitre II : Présentation du site d'étude</b>	
I. Cadre géographique-----	41
II. Contexte géologique et structural -----	43
III. Contexte climatique -----	46
IV. Caractérisation hydrologique du réseau hydrographique du bassin de la Moulouya 48	
V. Démographie et activités humaines -----	51
VI. Présentation de l'exploitation minière dans la région-----	52
VI.1. Historique de l'exploitation minière dans la région -----	52
VI.2. Le site minier Zeïda, historique et technique d'exploitation -----	53
VI.3.Diagnostic de l'état actuel des lieux dans la mine abandonnées Zeïda -----	56
<b>Chapitre III : Matériels et méthodes</b>	
I. Choix des stations d'échantillonnage-----	59
II. Echantillonnage des sédiments -----	60
III. Préparation des échantillons de sédiments -----	61
IV. Propriétés physico-chimiques des sédiments -----	61
IV.1. Caractérisation minéralogique par diffraction de rayons X (DRX) -----	61
IV.2. Granulométrie par diffraction laser -----	62
IV.3. Mesure du pH -----	62
IV.4. Dosage de la matière organique -----	63
IV.6. Mesure de la conductivité électrique -----	63
IV.7. Analyse des carbonates -----	64
IV.8. Dosage des métaux -----	64
<b>Chapitre IV : Résultats et discussions</b>	
I. Introduction -----	66
II. Caractérisation physique et physico-chimique des sédiments de l'oued Moulouya et de la retenue du barrage Hassan II -----	67
II.1. Caractérisation physique des sédiments de surface-----	67
II.1.1. Caractérisation des composants majeurs de la minéralogie des sédiments par DRX-----	67
II.1.2. Caractérisation Granulométrique des sédiments -----	69

II.2. Etude physico-chimique -----	71
II.2.1. Matière organique et carbonates : -----	71
II.2.2.pH : -----	73
II.2.3.Conductivité -----	74
II.2.4. Soufre total : -----	75
<b>III.    Eléments traces métalliques (ETM)-----</b>	<b>75</b>
III.1. Teneurs en métaux des sédiments de l’oued Moulouya, l’Oued Ansegmir et de la retenue du barrage Hassan II -----	75
III.2. Discussion de l’impact de la mine abandonnée Zeïda sur les teneurs en métaux des sédiments-----	79
III.2.1.Cartographie et discussion des teneurs en ETM-----	79
III.2.2. Indice de contamination -----	83
III.2.3. Synthèse à partir d’un traitement statistique (A.C.P.)-----	85
III.3. Comparaison des teneurs en métaux des sédiments étudiés avec ceux d’autres systèmes fluviaux-----	88
III.3.1. Comparaison des teneurs de références -----	88
III.3.2. Teneurs moyennes et polluants majeurs -----	89
Conclusion générale et recommandations -----	91
Références bibliographiques -----	94.
Annexes -----	105

## Introduction générale

La contamination par les éléments traces métalliques (ETM) des sols, de l'atmosphère, de l'hydrosphère et des sédiments représente un problème environnemental majeur. Ces éléments sont d'origines naturelles (altération des roches, volcanisme, érosion..) mais ils sont aussi issus des activités anthropiques (exploitation minière, industries métallurgiques..).

L'exploitation minière est une source principale d'ETM, en effet, durant la majorité des étapes de son développement, elle affecte à divers degrés l'environnement et généralement de façon irréversible, et induit formellement, la décadence de l'écosphère.

L'activité minière constitue l'un des piliers fondamentaux de l'économie marocaine, cependant, les mesures de protection de l'environnement ne sont guère une priorité dans ce secteur d'activité. En effet, l'exploitation minière actuelle et même ancienne porte atteinte à l'environnement qui n'est jamais une préoccupation.

Située dans Haute Moulouya à l'oriental du Maroc, la mine de Zeïda actuellement abandonnée, faisait partie du plus grand gisement plombifère du Maroc, cependant, et depuis 1985, elle est en abandon total sans réhabilitation : des carrières profondes remplies d'eau insalubre, des terrils miniers abandonnés et des haldes à résidus de traitement abandonnées près de l'oued Moulouya non loin du barrage Hassan II situé en aval à une quinzaine de kilomètres.

A Zeïda, la production de plomb a atteint 630 172 t, avec un concentré de plomb d'une teneur de 40 à 70%, les résidus de traitement et de décapage issus de cette activité sont délaissés sur place, et constituent une source de contamination importante, à court, et à long terme, particulièrement les résidus de traitement, riche en éléments traces métalliques (EL Hachimi, 2006),

Les déchets stériles et les déchets de traitement constituent la principale source de contamination après la fermeture de la mine (Younger, 2000), la mobilité de cette contamination dépend du volume des résidus, de leur emplacement, des facteurs intrinsèques, type de stériles, granulométrie. C'est pourquoi, la contamination est rarement limitée à l'échelle locale, au voisinage de la mine, sous l'influence des agents érosifs (hydriques et éoliens), persiste et se disperse sous forme dissoute et solide.

Les ETM présentent une grande affinité pour la phase solide (Blanquet et *al.*, 2004), ces particules finissent souvent par se sédimenter dans les lits ou au fond des oueds. Les sédiments ainsi contaminés, constituent par la suite, un réservoir important des ETM, surtout quand les conditions climatiques, favorisent les réactions d'adsorption et de précipitation de ces éléments. Cependant, les ETM ne restent pas définitivement piégées au sein des sédiments, mais peuvent rejoindre la colonne d'eau suite à la moindre modification des paramètres du milieu, tel que l'action des courants et la turbulence de l'eau qui cause leur remise en suspension, les réactions diagénétiques qui existent naturellement dans les sédiments, l'action des microorganismes, les réactions accompagnant les changements naturels ou anthropiques du potentiel oxydo-réducteur ou du pH (Ghanem, 2008), par exemple, la diminution du pH au-dessous d'un seuil définie pour chaque métal cause son relargage (Salvarredy, 2008) ainsi que la formation de complexes avec la matière organique ou inorganique, facilement mobilisable (Citeau, 2004).

Dans l'objectif d'étudier la contamination par les éléments traces métalliques des sédiments de l'oued Moulouya et de la retenue du barrage Hassan II en aval de la mine abandonnée Zeida, deux campagnes d'échantillonnage ont été effectuées, la première en saison humide (Février 2013), la deuxième en saison sèche (Juin 2013), des sédiments ont été prélevés et des paramètres physicochimiques ont été mesurés, des analyses ont été réalisées au laboratoire et tout ceci pour :

- 1- Caractériser les sédiments de surface de la zone d'étude (minéralogie, granulométrie, matière organique, carbonates..), cette caractérisation doit procurer d'importantes informations concernant l'origine des sédiments et leur rôle en tant qu'accumulateurs des ETM (Pb, Cu, Zn, As).
- 2- Déterminer les teneurs en ETM des sédiments de l'Oued Moulouya et du barrage Hassan II en aval de la zone d'étude.
- 3- Identifier les principales sources de pollution des ETM des sédiments étudiés, ainsi que le suivi de leur évolution le long de la zone d'étude.
- 4- Déterminer la contribution de l'affluent Ansegmir à la pollution en ETM des sédiments de l'Oued Moulouya et du barrage Hassan II.

## **Chapitre I : Etude bibliographique**

# I. Généralités sur la pollution des eaux et des sédiments

## I.1. Les sources de pollution des eaux et sédiments

Un milieu aquatique est dit pollué lorsque son équilibre est modifié de façon durable par l'apport de quantités trop importantes de substances plus ou moins toxiques d'origine naturelle ou anthropique.

Dans un milieu aquatique, on ne peut parler de pollution d'eau, sans parler de pollution des sédiments. Les sédiments constituent souvent, un réservoir de polluants en particulier pour les éléments traces métalliques (ETM) et deviennent par la suite une source potentielle de contamination pour les eaux. Les sources de pollutions sont multiples (Figure 1), mais peuvent être classées en deux majeures catégories :

Les sources de pollutions sont multiples, mais sont classées en deux majeures catégories :

### I.1.1. Pollution anthropique

Les sources de cette pollution sont multiples, la combustion reste la principale source, l'industrie, le stockage et l'incinération des déchets, l'agriculture, l'élevage, restent aussi des sources importante de pollution.

- **Les combustions fossiles et de biomasse :**

Les émissions de polluants dans l'atmosphère dû à la combustion des combustibles fossiles, charbon, pétrole et gaz naturel interviennent dans de nombreux secteurs d'activités (transport, activités industrielles et agricoles, etc.).

Les combustions de biomasse sont souvent rencontrées dans les pays en voie de développement, les aérosols ainsi générés contiennent principalement du carbone.

La nature dynamique de l'atmosphère favorise le transport des micropolluants atmosphériques sous forme d'aérosols (particulaire et liquide) et à l'état gazeux, depuis leurs sources vers les différents écosystèmes, par l'intermédiaire des retombées atmosphériques (Azimi et *al.*, 2003). Généralement, ces polluants finissent par rejoindre le milieu aquatique par drainage.

- **Les sources industrielles**

Les rejets non épurés des activités industrielles (Mines, cimenteries, usines chimiques...etc) sont très polluant à l'échelle locale. Ces rejets sont souvent riches en polluants tels que les métaux lourds (plomb, cadmium,..), les hydrocarbures aromatiques polycycliques, les micropolluants organiques, etc.

La plupart des rejets ne sont pas biodégradable, déversés directement dans les cours d'eau, ils affectent le milieu à longue durée.

- **L'agriculture**

Suite au développement démographique que connaît le monde entier, l'usage d'engrais (Nitrates) et de pesticide s'intensifie de plus en plus. Le ruissellement des eaux de pluie ou d'arrosage drainent ces derniers et les transportent vers des cours d'eau, causant un déséquilibre du milieu récepteur (pollution diffuse).

- **Les rejets domestiques**

Les rejets domestiques contiennent différents produits extrêmement nocifs pour l'environnement, tels que les matières organiques, les HAP, les solvants, les produits d'entretien du sol, des organismes pathogènes, etc.

Les décharges se situent souvent près des cours d'eau, on assiste parfois à un largage direct des rejets dans ce dernier. Les lixiviats chargés bactériologiquement et surtout chimiquement de substances tant minérales qu'organiques (Hakkou, 2001), peuvent être drainés par ruissèlement jusqu'au cours d'eau, causant ainsi sa pollution.

### **I.1.2. Pollution naturelle**

La pollution naturelle est due à divers agents :

- ✓ **Agents physiques**

Comprend les matières inertes insolubles de toutes dimensions pouvant rester en suspension dans l'eau. Elles sont sans activité chimique ou biologique. Que ce soit du sable, du limon ou de l'argile, ces matières sont en grande partie le résultat de l'érosion. La pluie, la neige, la glace amène une désagrégation des roches compactes, des dépôts meubles ou des sols.

- ✓ **Agents chimiques organiques**

Le ruissellement dans les zones présentant un couvert végétal entraîne toutes sortes de matières organiques dans les cours d'eau et dans les lacs. Ces matières organiques proviennent souvent de la dégradation des matières végétales. Cette pollution organique colorante engendre souvent l'apparition de macromolécules acides comme l'acide humique ou fulvique, entraînant une diminution notable du pH.

- ✓ **Agents chimiques inorganiques**

Les polluants chimiques inorganiques apparaissent dans les eaux lorsque le sol et les formations géologiques sont lessivés par les précipitations. Ce lessivage provoque une solubilisation des sels constituants de la lithosphère et la présence d'ions plus ou moins toxiques dans les eaux de drainage. La nature géologique du terrain conditionne les types d'ions qui s'y trouvent. La quantité et la qualité de la précipitation déterminent l'intensité ce de phénomène. Les éléments traces métalliques constituent les polluants inorganiques les plus souvent rencontrés dans les milieux aquatiques.

- ✓ **Agents biologiques**

Les cours d'eaux contiennent une multitude d'organismes de toutes tailles formant des chaînes alimentaires spécifiques. L'apport naturel d'éléments organiques ou inorganiques peut modifier ces équilibres de façon temporaire ou permanente en favorisant ou en inhibant la croissance de certains organismes.

## I.2. Les différentes formes de pollution des eaux et des sédiments

Généralement, on distingue deux grandes formes de pollution qui se différencient selon l'étendu, l'importance, et la durée d'action.

### - **Pollutions ponctuelles**

Relativement immédiates, elles proviennent de sources bien identifiées et peuvent être traitées au niveau des stations d'épuration :

- Les déchets produits par les usines
- Les déchets de système d'égouts
- Les déchets miniers
- Déchets provenant des puits de pétrole

La pollution ponctuelle est facilement détectable et contrôlée assez vite.

### - **Pollutions diffuses**

Comme celles dues aux épandages de pesticides et d'engrais sur les terres agricoles, qui concernent l'ensemble d'un bassin versant, elles mettent plus de temps à atteindre les milieux aquatiques et ne peuvent être traitées qu'à la source en diminuant l'usage des substances responsables. Le transfert se fait de différentes manières :

- Quand la pluie ou la neige se déplace à travers le sol et ramasse les polluants tout en migrant vers un cours d'eau,
- le ruissellement et déplacement des engrais des terres agricoles ainsi que des lisiers issus de l'élevage des animaux,
- polluants atmosphériques déposés sur terre puis drainés par les cours d'eaux,
- drainage des eaux pluviales des pelouses, parcs de stationnement et des rues.

Ces pollutions sont beaucoup plus dur à identifier, leur control reste très complexe suite à leur vaste étendu. Elles peuvent être Permanentes (rejets domestiques d'une grande ville, par exemple), périodiques (augmentations saisonnières des rejets liées au tourisme, aux crues, etc), accidentelles ou aiguës (déversement intempestif de produits toxiques d'origine industrielle ou agricole, ou du lessivage des sols urbains lors de fortes pluies), etc.

## I.3. Les différents types de pollution

Les Principaux types de pollution des milieux aquatiques continentaux peuvent être physique, chimique, organique, microbiologique. D'après Lévêque (1996), la nature des polluants produits dépend de leurs sources (Tableau.1) :

**Tableau. 1** : Différents types de pollution

TYPES DE POLLUTION	NATURE	SOURCES
<b>&gt; Physique</b>		
<b>pollution thermique</b>	rejets d'eau chaude	centrales thermiques
<b>pollution radioactive</b>	radio-isotopes	installations nucléaires
<b>&gt; Matière organique</b>		
	glucides, lipides, protides	effluents domestiques, agricoles, agro-alimentaires
	ammoniac, nitrates	élevages et piscicultures
<b>&gt; Chimique</b>		
<b>Fertilisants</b>	nitrates, phosphates	agriculture, lessives

<b>métaux et métalloïdes</b>	mercure, cadmium, plomb, aluminium, arsenic...	industries, agriculture, pluies acides, combustion
<b>Pesticides</b>	insecticides, herbicides, fongicides	agriculture, industries
<b>Organochlorés</b>	PCB, solvants	industries
<b>composées organiques de synthèse</b>	nombreuses molécules	industries
<b>Détergents</b>	agents tensio-actifs	effluents domestiques
<b>Hydrocarbures</b>	pétrole et dérivés	industrie pétrolière, transports
<b>&gt; Microbiologique</b>	bactéries, virus, champignons	effluents urbains et d'élevage

#### I.4. Les paramètres caractéristiques de la pollution

Une grande variété de paramètres indicateurs de pollution de l'eau existe (physiques, chimiques ou biologiques), cependant, quelques analyses ne se font plus uniquement sur l'eau, mais aussi sur les sédiments (INERIS, 2010).

Parmi les principaux paramètres de caractérisation de la pollution :

- **Matières en suspensions (MES)** : Les matières en suspension se composent de fines particules insolubles. Leur provenance est variée : érosion des sols, débris organiques, rejets urbains ou industriels (agro-alimentaires, papeterie, textile, chimie), résidus miniers, etc. Les MES entraînent un déséquilibre du milieu aquatique en augmentant la turbidité ; diminuer l'oxygène dissous, limiter le développement de la vie aquatique et créer des déséquilibres métaboliques entre diverses espèces (INERIS, 2010)..
- **Demande biochimique en oxygène en 5 jours (DBO5)** : correspond à la quantité d'oxygène nécessaire à la destruction ou à la dégradation des matières organiques d'une eau par les microorganismes du milieu. Ce paramètre est utilisable soit pour quantifier la charge polluante organique de l'eau, soit pour évaluer l'impact d'un rejet sur le milieu naturel (INERIS, 2010).
- **Demande chimique en oxygène (DCO)** : représente tout ce qui est susceptible de demander de l'oxygène, en particulier les sels minéraux oxydables (sulfures, sels de métaux, etc.) et la majeure partie des composés organiques, biodégradables ou non (INERIS, 2010).
- **L'azote** peut se trouver sous forme minérale (ammoniacal, nitrate) ou organique :
  - Les **Nitrates** qui constituent le stade final de l'oxydation de l'azote.
  - Les **Nitrites** qui constituent une étape importante dans le cycle de l'azote
  - L'**ammoniaque** qui constitue la forme réduite de l'azote.
- **Le phosphore** :  
Il peut se trouver sous forme minérale ou organique. Élément indispensable à la vie des algues, la présence de phosphore entraîne un risque d'eutrophisation du cours d'eau ou du lac, c'est à- dire que celui-ci peut se voir envahi par un développement excessif de la population algale (EBF, 2010).
- **Les teneurs en métaux lourds** :

Les éléments métalliques, tels que Pb, Zn, Cu, Cd, présentent une importante source de pollution des milieux aquatiques. Souvent non biodégradable et extrêmement

toxique, leur dosage est primordial lorsqu'on parle de pollution, surtout suite à une exploitation minière.

En effet, même à faible concentration, quelques éléments métalliques peuvent être nocifs pour les microorganismes. Les micro-organismes responsables des phénomènes de dégradation des matières organiques sont sensibles par exemple au plomb dès 0.1 mg/l (INERIS, 2010).

- **La quantité de germes et de virus**, les teneurs en **graisses, détergents**.
- **Le pH et la conductivité**, aident à la caractérisation d'un effluent et donc à son traitement (EBF, 2010).
- **La température :**  
Elle est l'un des facteurs écologiques les plus importants parmi tous ceux qui agissent sur les organismes aquatiques. Elle joue un rôle primordial dans la distribution des espèces. Les augmentations/diminutions de température peuvent être fatale pour certaines espèces, mais également favoriser le développement d'autres espèces en entraînant ainsi un déséquilibre écologique.

## **II. Les éléments traces métalliques (Pb, Zn, Cu, Cd, As) dans les sédiments.**

### **II.1. Les sédiments**

Les sédiments sont représentés par des apports allochtones ou autochtones, organiques ou minéraux, arrivant ou se déposant dans un écosystème aquatiques sous diverses formes dissoutes et particulaires. Ces deux fractions sont transportées par les cours d'eau et peuvent être déposées dans le milieu (rivière, oued, etc.) avant d'atteindre le bassin de sédimentation (Lac, Barrage, Mer, etc.). Elles sont la conséquence de l'érosion des affleurements rocheux et des sols.

Différents facteurs influencent la sédimentation des particules comme par exemple : le débit, la direction et la stabilité du courant, les turbulences, la forme et la profondeur des cours d'eau, la taille des particules, etc.

Afin qu'une particule sédimente, la vitesse du courant doit descendre sous une valeur critique d'autant plus faible que la particule est petite.

Selon Capilla (2003), sur une échelle de temps courte (de l'ordre de l'année), deux comportements alternent : en période d'étiage, les faibles courants favorisent le dépôt des sédiments ; en période de crue au contraire, la forte érosion augmente le nombre des particules en suspension. Sur une échelle de temps plus longue, la tendance globale de sédimentation peut avoir lieu dans les zones de faible vitesse, ainsi que dans les estuaires où s'ajoutent les mécanismes chimiques.

### **II.2. Généralités sur les éléments traces métalliques**

Un métal est un élément chimique issu souvent d'un minerai doté d'un éclat particulier. C'est un bon conducteur de chaleur et d'électricité, ayant des caractéristiques de dureté et de malléabilité. Leur association avec d'autres éléments forment facilement des alliages (Lydia, 2010).

On appelle métaux lourds les éléments métalliques naturels caractérisés par une masse volumique élevée, supérieur à 5g par cm<sup>3</sup> (Callender, 2003), ce qui est le cas pour la plupart des métaux de transition.

Selon Baize (1997), les éléments traces (ET), sont les 80 éléments chimiques constituant la croûte terrestre. La concentration de ne dépasse pas 0.1%. L'ensemble de ces éléments constitue seulement 0.6% du total, tandis que les 12 éléments majeurs, (O ; Si ; Al ; Fe ; Ca ; Na ; K ; Mg ; Ti ; H ; P ; Mn), représentent 99,4 %.

L'appellation « élément traces métallique » vient du fait que certains éléments traces sont des métaux, tels que Cd, Cr, Zn, Pb, Cu, tandis que d'autres ne sont pas métalliques. Cette appellation est mieux adaptée que "métaux lourds" car certains métaux toxiques ne sont pas particulièrement "lourds" tels que le zinc. De même, certains éléments toxiques ne sont pas des métaux mais des metalloïdes tels que l'arsenic (Figure 1).

Elément

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

Métaux lourds
Non-métaux et metalloïdes associés

**Figure 1** : Métaux lourds dans la classification périodique

On distingue 2 catégories d'éléments traces :

- **Eléments traces essentiels** : indispensables aux processus biologique, mais sont toxiques a fortes concentrations (ex : cuivre (Cu), Zinc (Zn), Fer (Fe), chrome (Cr)),
- **Eléments traces non-essentiels** : ces éléments n'ont aucune fonction métabolique (ex : Pb, Cd, Hg), ils sont souvent toxique à un seuil inférieur à celui des éléments essentiels.

### II.3. Sources des métaux dans les sédiments de surface

L'origine des éléments métalliques dans les sédiments peut être soit naturel, soit anthropique. Suite au développement industriel, les métaux sont d'avantage utilisés dans la nouvelle technologie (métallurgie et électronique).

L'activité minière et ses industries associées restent les sources principales des métaux lourds dans les sédiments. Cependant, il existe d'autres sources (Callender, 2003) :

- Les engrais et pesticide utilisés dans le domaine agricole,
- Les déchetteries des villes et les déchets médicaux,
- Les émissions des unités industrielles,
- Les effluents des égouts et boues.

Naturellement, les métaux sont présents dans la croûte terrestre, la distribution de leurs concentrations est hétérogène à la surface du globe (Garret, 2000). L'altération et la désagrégation des roches (érosion mécanique), ainsi que leurs dissolutions par voie chimique (acide carbonique ou humique) peuvent induire un enrichissement de l'eau en éléments métalliques. L'eau transporte les débris rocheux et les divers sels en solution vers l'aval, et dès que la vitesse du cours d'eau diminue (Faible pente), on assiste à une sédimentation des particules en suspension. Dans ces conditions les ETM s'accumulent au fond et dans les berges des cours d'eau.

Globalement, les émissions d'éléments traces métalliques d'origine anthropique restent de loin les plus abondants par rapport à ceux d'origine naturelle. Ci-dessous quelques, exemple de comparaison d'émissions anthropique et naturelle (Pb, Zn et As) :

- **Pb** : D'après Nriagu (1979), Les émissions issues des activités anthropiques constituent 80% du plomb dans l'environnement, tandis que les émissions naturelles sont de 4% et sont souvent sous forme inorganique,
- **Zn** : D'après Nriagu (1991, 1996), les émissions naturelles ne représentent que 7% des émissions totales de cet élément dans l'environnement, étant donné que la production et le traitement de minerai et les activités industrielles représenteraient 75% et 18% respectivement, des émissions du Zn dans le milieu naturel.
- **As** : les émissions naturelles présentent environ 30% des émissions total, tandis que les émissions anthropiques, en constituent 70%, surtout sous forme d'émissions minières et industrielles.

Concernant les métaux lourds qui font l'objet de cette étude à savoir le Cd, Pb, Cu, Zn et As, leurs différentes sources potentielles sont mentionnées ci-dessous (d'après Dean *et al.*, 1972 ; Rose *et al.*, 1979 ; Förstner et Wittmann, 1979, El Hachimi, 2006) :

• **Le plomb :**

<b>Origine naturelle</b>	<b>Origine anthropique</b>
- Cérosite PbCO <sub>3</sub> - Anglésite PbSO <sub>4</sub> - galena (PbS) - Pyromorphite Pb <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Cl - Plombojarosite PbFe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub> (OH) <sub>12</sub> - Oxydes de Fe et de Mn	- Extraction et production minière - Raffinage du pétrole - Industrie métallurgique - Combustion des carburants - Incinération des déchets - Engrais

• **Le zinc :**

<b>Origine naturelle</b>	<b>Origine anthropique</b>
- Sulfates et carbonates de Zn - Blende (ZnS) - smithsonite (ZnCO <sub>3</sub> ) - Zinc Arsenid (ZnAs <sub>2</sub> ) - Silicates hydratés - Minéraux argileux - Oxydes de Fe et Mn - Matière Organique	- Extraction et production minière - Raffinage du pétrole - Industrie métallurgique - Utilisation urbaine, toitures, électricité - Huiles - Industrie pétrochimique - Agriculture

- **Le cuivre**

<b>Origine naturelle</b>	<b>Origine anthropique</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sulfures, oxydes, carbonates, sulfates et silicates</li> <li>- chalcopirite (CuFeS<sub>2</sub>)</li> <li>- origine hydrothermale (dans des grès et schistes)</li> <li>- Oxydes de Mn</li> <li>- Limonite</li> <li>- Matière organique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Extraction et production minière</li> <li>- Raffinage du pétrole</li> <li>- Incinération des déchets</li> <li>- Industrie photographique</li> <li>- Engrais</li> </ul>

- **Le cadmium**

<b>Origine naturelle</b>	<b>Origine anthropique</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Greenochite CdS</li> <li>- Sulfures de Zn adsorbés sur la matière organique</li> <li>- les oxydes de Fe et Mn</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Incinération des déchets</li> <li>- Industrie pétrochimique</li> <li>- Engrais</li> <li>- Cimenterie</li> </ul>

- **L'arsenic**

<b>Origine naturelle</b>	<b>Origine anthropique</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- arsénopyrite (FeAsS)</li> <li>- Allactite (Mn<sub>7</sub>(AsO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>8</sub>)</li> <li>- Sinnerite (Cu<sub>6</sub>As<sub>4</sub>S<sub>9</sub>)</li> <li>- Bearsite (Be<sub>2</sub>(AsO<sub>4</sub>)(OH)<sub>4</sub>(H<sub>2</sub>O))</li> <li>- Phaunouxite (Ca<sub>3</sub>(AsO<sub>4</sub>)<sub>11</sub>(H<sub>2</sub>O))</li> <li>- Réalgar (AsS)</li> <li>- Arséniate, Arsénite</li> <li>- fumerolles volcaniques</li> <li>- Altération des granites, schistes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- engrais</li> <li>- industrie métallurgique</li> <li>- industrie du bois, peintures, micro-électronique</li> <li>- Industrie minière</li> <li>- potassium arsenide (K<sub>3</sub>As<sub>11</sub>)</li> </ul>

Parmi les éléments traces métalliques rencontrés dans les sédiments, les plus fréquemment analysés pour caractériser la pollution sont, comme cité précédemment, le plomb, le cuivre, le zinc, et le cadmium, auxquels est ajouté un métalloïde lourd l'arsenic, dû à leur forte toxicité et à leur propriété variable (formation de complexe, mobilité, spéciation). Ces éléments ont des effets néfastes sur la santé (Tableau 2) :

**Tableau.2** : Toxicité des éléments étudiés

<b>Particules</b>	<b>Toxicité</b>
<b>Plomb</b>	Trouble du système nerveux, affection du foie et des reins
<b>Cadmium</b>	Affections respiratoires, Troubles rénaux, augmentation de la tension
<b>Zinc</b>	Neurotoxique, anémie et neutropénie (baisse du nombre de globules blancs)
<b>Cuivre</b>	jaunisse, hémolyse, troubles intestinaux, anurie, hypotension
<b>Arsenic</b>	irritation des poumons, cancers cutanés, infertilité, altération de l'ADN

## II.4. Géochimie du Pb, Zn, Cu, Cd et As

### 4.1. Le plomb

Le plomb (Pb) est caractérisé par sa couleur gris bleuâtre, il appartient à la famille des cristallogènes, facilement maniable et à faible conductivité électrique. Le plomb, de numéro atomique 82, a une forte densité et il est doté d'une inertie chimique face aux acides.

Selon Baize (1997), la concentration moyenne en plomb de la croûte terrestre serait de l'ordre de 13 à 16 mg/kg.

Cet élément n'est pas affecté par les processus redox, mais selon les conditions de pH et de Eh, il peut subir différents mécanismes de contrôle de sa solubilité. En milieu réducteur, sa solubilité est limitée par la précipitation du sulfure de plomb (la galène).

En conditions oxydantes, le plomb est nettement plus soluble, il précipite sous forme de sulfate de plomb (anglésite) ou de carbonate de plomb (cérusite) en milieu carbonaté. Avec les ions carbonates, il forme des complexes, ce qui augmente sa solubilité aux pH élevés.

Dans les minerais, le plomb est très souvent associé au zinc mais aussi à d'autres éléments (Fe, Cu, Cd, As...), dû à son caractère chalcophile, il existe rarement à l'état natif dans l'environnement. Il est aussi associé au gisement de sulfures, son minerai principal est la galène (PbS) qui en contient 86.6% (Salvarredy, 2008), souvent associée à la blende (ZnS) et à la pyrite (FeS<sub>2</sub>).

Le plomb peut exister sous d'autres variétés telles que la cérusite (PbCO<sub>3</sub>), l'anglésite (PbSO<sub>4</sub>), ou associées à d'autres métaux pour donner naissance à la wulfénite (PbMnO<sub>4</sub>).

Dans le milieu fluviatile, on rencontre le plomb sous forme de Pb<sup>2+</sup>, correspondant à l'état le plus stable dans l'environnement (Callender, 2003), PbOH<sup>+</sup> ou PbCO<sub>3</sub> et PbHCO<sub>3</sub><sup>+</sup>, selon le pH des eaux (Figure 2); neutres (pH=7,3) ou alcalines (pH= 8,5), (Dyrsen et Welborg, 1980).

À des pH supérieur à 6, le Pb peut aussi être adsorbé par les argiles, tandis que pour les eaux acides, le Pb est associé aux sulfates (PbSO<sub>4</sub>).

Le plomb est un métal qui a une très forte affinité pour la matière particulaire et son adsorption sur la matière organique constitue le processus le plus important favorisant sa sorption. Cette adsorption forme des complexes organométalliques très mobiles et peuvent présenter une grande toxicité (LHA, 2007). En outre, le Pb est largement adsorbé sur les limons et les argiles (Callender, 2003).



**Photo. 1** : dépôt noirâtre (Plomb) visible sur les sédiments fluviaux

#### 4.2. Le zinc

Le zinc (Zn), de numéro atomique 30, est caractérisé par un comportement chalcophile marqué une géochimie peu complexe et par l'association fréquente avec le soufre (Mahan, 1987).

Naturellement, le zinc s'associe avec le Plomb, le Cuivre, l'Or, l'argent et le fer. La teneur moyenne en zinc de la croûte terrestre serait comprise entre 70 et 132 mg/kg (Baize, 1997). Son minéral principal est la sphalérite (ZnS), qui peut être associée à d'autres sulfures, comme la galène (sulfure de plomb/ PbS). Le zinc peut aussi se présenter sous d'autres formes telles que la smithsonite (carbonate de zinc/ ZnCO<sub>3</sub>).

Le zinc est facilement adsorbé par les minéraux argileux, les carbonates ou les hydroxydes, d'où ses concentrations élevées dans les sédiments argileux et schistes (80 à 120 mg / kg) (Baize, 1997). Étant un métal cationique, son adsorption augmente avec le pH (Rollin et al., 2006), et peut diminuer suite à la formation de complexes avec les ligands organiques ou inorganiques.

L'hydrolyse du zinc s'effectue à des pH >7.7, ces espèces hydrolysées sont fortement adsorbées sur les surfaces des minéraux.

Dans les eaux fluviales, Zn<sup>2+</sup> (appelé ion zincique), Zn(OH)<sup>+</sup> et Zn(OH) sont les principales formes dissoutes du zinc (Bouasria, 2008). Cependant, à des pH > 8, l'hydroxyde solide peut précipiter et donc être prépondérant dans des milieux basiques (Rollin et al., 2006) (Figure 2).

#### 4.3. Le Cuivre

Le cuivre (Cu), de numéro atomique 29, est assez malléable, il possède une conductivité thermique et électrique exceptionnelle, seul l'argent, comparé au cuivre, a une meilleure conductivité électrique à température ambiante.

Le cuivre est moyennement réparti dans la croûte terrestre, sa composition moyenne serait comprise entre 45 et 70 mg/kg (Baize, 1977).

L'état natif du cuivre est assez rare dans l'environnement, étant chalcophile, le cuivre s'associe souvent à des sulfures, le zinc, le cadmium, et le plomb. On le trouve le plus

fréquemment sous forme de sulfure ou de sulfosel. Les minerais sulfurés [chalcopyrite ( $\text{CuFeS}_2$ ), chalcosine ( $\text{Cu}_2\text{S}$ )] forment 80% de la production mondiale : la bornite ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), la chalcocite ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) et les carbonates azurite [ $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ ], et la malachite  $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ .

Dans les eaux naturelles, pour un  $\text{pH} < 6$ , le cuivre reste à l'état d'ion  $2+$ , à  $\text{pH}$  neutre, on rencontre le  $\text{Cu}(\text{CO}_3)_2^{2-}$  et  $\text{CuCO}_3$  (Figure 2). Ce dernier est plus important pour les  $\text{pH}$  7 et 8, et pour des  $\text{pH} > 8$ , le complexe de dihydroxide de cuivre ( $2+$ ) prédomine (Salvarredy, 2008).

Cependant, le cuivre, présente une affinité plus élevée que le plomb pour les ligands organiques, les complexes ainsi formés sont plus mobiles que les formes précédentes.

#### 4.4. Cadmium

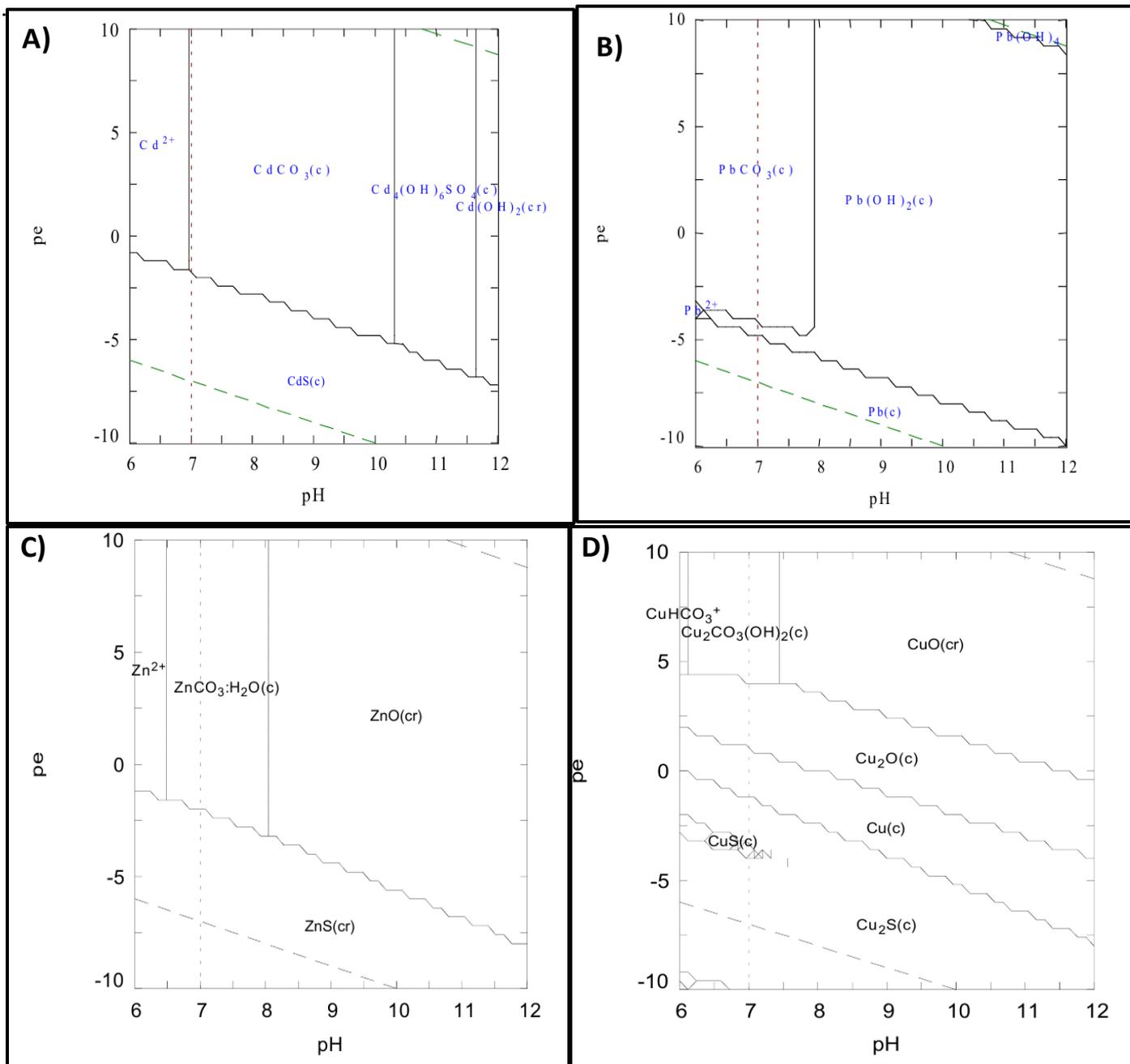
Le cadmium, de symbole Cd, et de numéro atomique 48, est un métal ductile, malléable, et résistant à la corrosion atmosphérique.

Le cadmium existe dans la majorité des roches, mais de façon prépondérante dans les roches sédimentaires et plus particulièrement dans celles riches en carbone, sulfures et phosphates (Baize, 1997). Le cadmium n'existe pas à l'état natif, étant chalcophile, il est très souvent associé au zinc, les deux éléments présentent des structures ioniques et une électronégativité proche, c'est pourquoi, le cadmium est présent dans presque tous les minerais de zinc (la teneur en cadmium varie de 0,01 à 0,05 %) sous forme de sulfures de zinc ( $\text{ZnS}(s)$ ), sphalérite ou blende et wurtzite, et des carbonates tel que la smithsonite ( $\text{ZnCO}_3$ ).

Le cadmium est également présent dans des minerais de plomb et de cuivre, ainsi que dans des phosphates, et dans des gisements de sulfure sous la forme de greenockite ( $\text{CdS}$ ), mais ce minéral est très rare.

Dû à sa nature ionique, le comportement du cadmium est fortement contrôlé par le  $\text{pH}$  (Figure 2). Dans les eaux naturelles, à des  $\text{pH} < 8$ , l'ion  $\text{Cd}^{2+}$  prédomine, tandis que la forme  $\text{CdCO}_3$  est prédominante entre les  $\text{pH}$  8 et 10 (Hem, 1972).

Dans sa spéciation, il est généralement considéré comme dissous, seules les rivières très riches en matières en suspension ou des eaux proches du fond des rivières, peuvent présenter du Cd adsorbé à la fraction solide (Li et al., 1984). L'adsorption du Cd dans la fraction solide est considérée comme étant un enjeu majeur pour expliquer la concentration de cet élément dans les eaux naturelles (Lum, 1987).



**Figure.2** : Diagrammes de prédominances pH/pE : (A) Cadmium, (B) Plomb, (C) Zin et du Cuivre (D), selon (Rollin et *al.*, 2006)

#### 4.5.L'arsenic

L'arsenic n'est pas un métal lourd, mais classé comme contaminant inorganique, vu qu'il est souvent associé à des métaux lourds. L'arsenic est un métalloïde, chalcophile, de symbole As et de numéro atomique 33, présentant des propriétés intermédiaires entre celles des métaux et des non-métaux.

L'arsenic est peu abondant dans la partie superficielle de l'écorce terrestre, sa concentration est de l'ordre de 2mg/kg (Rollin et *al.*, 2006). Cependant, le fond géochimique peut atteindre 200mg/kg dans les dépôts calcaires, phosphatés ou dans des schistes.

Les minerais de l'arsenic se trouvent principalement dans sa forme arsénopyrite (FeAsS). D'autres minerais sont exploités sous forme de réalgar (As<sub>2</sub>S<sub>2</sub>) ; l'orpiment (As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>) et la loellingite (As<sub>2</sub>Fe).

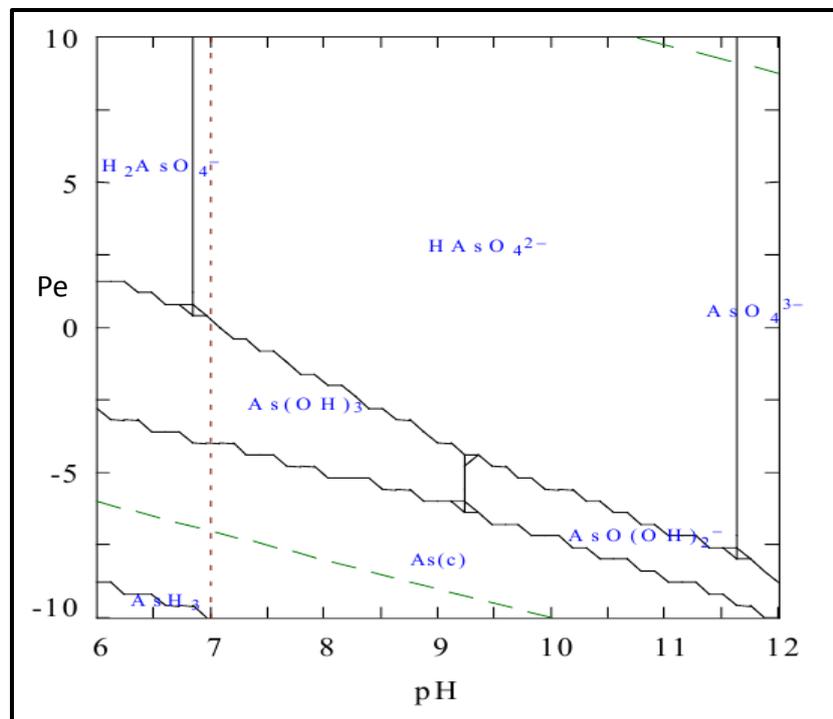
En conditions oxydantes, l'arsenic est soluble sous deux niveaux d'oxydations, la forme pentavalente (AsO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HAsO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, H<sub>2</sub>AsO<sub>4</sub><sup>-</sup>, H<sub>3</sub>AsO<sub>4</sub> selon le pH) (Figure 3). C'est la forme prédominante en conditions très oxydantes (LHA, 2007). Lorsque les conditions sont moins oxydantes, la forme majoritaire est la trivalente, nettement plus toxique (AsO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, HAsO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, H<sub>2</sub>AsO<sub>3</sub><sup>-</sup>, H<sub>3</sub>AsO<sub>3</sub> selon le pH).

Etant solubles, les formes trivalentes et pentavalentes, peuvent atteindre de fortes concentrations sans être affectées par des processus de précipitation de minéraux (LHA, 2007). Ces formes sont susceptibles de s'adsorber à la surface de minéraux tels que les oxydes métalliques, en particulier les oxydes de fer. Cette sorption dépend du pH.

Les arsénates solubles migrent avec l'eau. Si le climat est aride, les eaux se concentrent (minéralisation) et la teneur en arsenic dissous augmente jusqu'à des niveaux dangereux.

Dans les sols, l'arsenic est présent sous forme de composés neutre inorganique : l'arsénite As(III), qui correspond à sa forme la plus toxique, et l'arséniate As(V). Ces formes sont solides, liquides voire gazeuses.

L'arsenic est souvent adsorbé à la surface des argiles et de la calcite. Les complexes ainsi formés restent peu toxiques et sont communément rencontrés dans la nature (Smedley et Kinniburgh, 2002).



**Figure.3** : Diagramme de prédominance pH/Pe de l'arsenic (Rollin et al., 2006).

## II.5. Comportement, accumulation et relargage

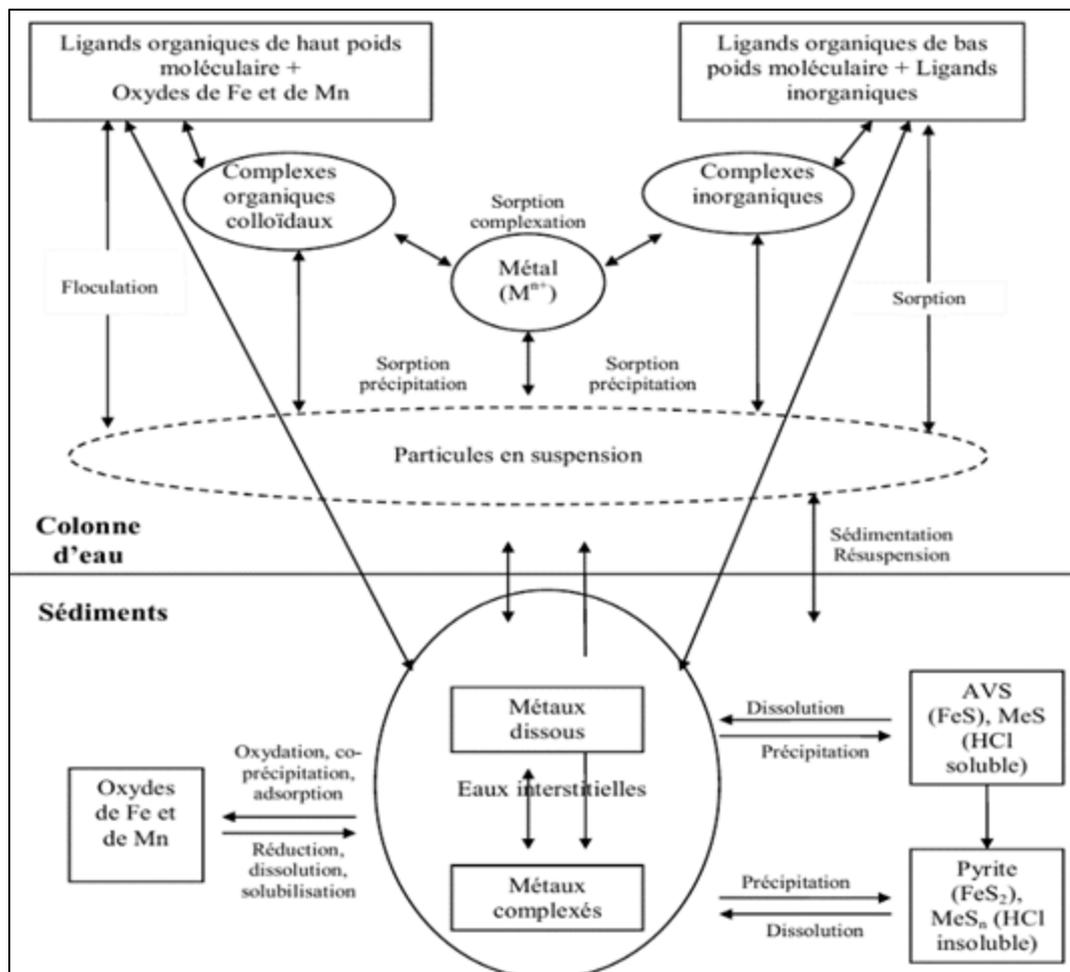
Dans les conditions naturelles, les ETM sont peu soluble dans l'eau, et restent très souvent associés à la phase solide, d'où leur présence en faibles concentrations et la difficulté de leur détection dans l'eau (Blanquet *et al.*, 2004). Afin d'étudier l'impact des apports anthropique dans l'écosystème aquatique, la recherche des ETM dans les sédiments est indispensable (Roy et Crawford, 1984; Dominik *et al.*, 1984).

Les ETM libérés dans le milieu aquatique à l'état particulaire se déposent facilement. En outre ceux qui arrivent à l'état dissous réagissent avec des ligands organiques (acides humiques et fulviques) et inorganiques (argiles, carbonates, oxydes de Fe et de Mn, etc.), formant ainsi des complexes qui se fixent sur des particules en suspension et puis sédimentent. Ces complexes d'ETM peuvent également rester à l'état dissous et diffuser dans l'eau interstitielle du sédiment (Figure 4).

Le dépôts des particules au fond, ou aux berges du cours d'eau, peut conduire à une accumulation des ETM dans les sédiments, ces derniers jouent par suite le rôle d'un réservoir des ETM, à court, ou à long terme, cependant, le danger réside dans le fait que ces éléments peuvent être transférés en partie vers les eaux, vu que ces éléments ne sont pas fixés de façon permanente et peuvent être libérés, suite aux changements des conditions environnementales, telle que le potentiel d'hydrogène (pH), potentiel redox (pH), température (James, 1978 et Förstner, 1987).

En effet, Le degré dans lequel un métal est absorbé ou précipité dépend notamment de ses propriétés intrinsèques (état(s) d'oxydation, rayon atomique, etc.), des paramètres physico-chimiques de l'environnement (pH et potentiel d'oxydoréduction), de la nature de l'absorbant (charge dépendant du pH, type de complexes ligands, surface spécifique), des autres métaux (ou d'autres cations majeurs) présents et de leurs concentrations (Alloway et Ayres, 1997; Sigg *et al.*, 2000).

Les sédiments se déplacent plus ou moins rapidement d'amont en aval, entraînant avec eux les métaux qui les contaminent. Le comportement des métaux dans les sédiments, que ce soit accumulation, ou remobilisation, est contrôlé par plusieurs processus chimiques (Figure 4) :



**Figure.4** : Modèle conceptuel du cycle des métaux traces dans les eaux de surface et les sédiments côtiers, présenté en tenant compte des principaux supports de ces métaux (les oxydes de Fe et de Mn et les sulfures) (Audry, 2003 et Burdige, 2006)

### II.5.1. La complexation

Dans les milieux aqueux, les métaux sont présents sous différentes formes chimiques (spéciation). Les composés chimiques inorganiques (anions majeurs tels que les carbonates, chlorures et hydroxydes) et organiques (composés formant la matière organique dissoute) présents dans ces milieux constituent des ligands capables de complexer les ions métalliques (Blanquet et *al.*, 2004)

**Réaction de complexation :**



Me : élément métallique, L : ligand organique ou inorganique, MeL : complexe métal-ligand

#### • Complexation aqueuse

La complexation aqueuse affecte directement la mobilité des éléments métalliques, ces métaux peuvent former différents complexes, que ce soit avec des ligands organiques (complexes très stables) ou inorganique.

#### ➤ Ligands organiques

Les ligands organiques sont produits par des processus biologiques (McCarthy et *al.*, 1996), On en cite :

- Les acides organiques de faible taille (les acides aminés, l'acide acétique, les phénols),
- Les ligands macromoléculaires tels que les protéines et les glucides,
- Les acides humiques et les acides fulviques.

Ces ligands organiques jouent un rôle essentiel dans la complexation des éléments métalliques (Bouasria, 2008), et souvent en compétition avec l'hydrolyse dans le milieu aquatique.

#### ➤ Ligands inorganiques

Les principaux ligands inorganiques qui interviennent dans le milieu aquatique sont : OH<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> et S<sup>2-</sup> (Sigg *et al.*, 1992). Certains de ces complexes sont très solubles.

Une augmentation de la concentration d'un ligand (organique ou inorganique), peut conduire à une augmentation de la concentration aqueuse en métal dû à la formation de complexes de coordination. Une variation des conditions redox peut causer la mobilisation ou l'immobilisation d'un élément donné.

#### • Complexation avec des colloïdes

Les colloïdes (minéraux et organiques), grâce à leurs différentes caractéristiques (petite taille, surface spécifique élevée..), présentent une affinité élevée pour les ETM (Citeau, 2004).

Les complexes ainsi formés augmentent considérablement la mobilité des ETM, vu que ces colloïdes, peuvent migrer à la même vitesse que l'eau.

### II.5.2. Précipitation/dissolution et Co-précipitation

Naturellement, la concentration des métaux permet rarement leur précipitation, mais elle peut tout de même avoir lieu. Cependant, les phénomènes d'adsorption ou de co-précipitation précèdent la précipitation.

La co-précipitation correspond à l'incorporation de l'élément minéral dans un autre minéral majeur (Rollin *et al.*, 2006). Elle peut avoir lieu suite à l'évolution de l'adsorption vers une interaction plus forte, ceci conduit à la réorganisation de la structure de la phase solide, donnant naissance à des phases solides mixte.

Les éléments métalliques peuvent être associés avec les carbonates en phases séparées ou en occupant les positions structurales à l'intérieur des carbonates de calcium, et surtout de magnésium (Bouasria, 2008).

La co-précipitation et l'adsorption paraissent être les mécanismes principaux qui interviennent dans l'association métal-carbonates.

La précipitation des carbonates métalliques peut être schématisée par la réaction suivante :



Les carbonates constituent une phase importante d'adsorption surtout quand le milieu est pauvre en matière organique et en oxydes de Fe et de Mn.

### II.5.3. Les phénomènes d'adsorption/désorption

L'interface eau-sédiment est un lieu d'échange cationique et de réactions chimiques continues. Ces réactions affectent à la fois la composition chimique de l'eau et celle des sédiments. La compréhension de ces phénomènes est donc essentielle pour assimiler le comportement des métaux dans cette interface

#### • L'adsorption

L'adsorption correspond à l'interaction entre un métal et la surface d'une particule (Dechelette, et Palvadeau, 2004), ou plus précisément à sa fixation par liaison chimique. L'adsorption sur les surfaces solides constitue un important mécanisme de contrôle des concentrations des métaux lourds dans les sédiments. L'adsorption correspond donc, à un important facteur causant l'accumulation des ETM dans les milieux aquatiques.

Les minéraux argileux, les oxydes de Fe et Mn et la matière organique, sont parmi les constituants majeurs des sédiments et des sols. Ces particules ont une grande surface spécifique qui leur permet d'adsorber les cations métalliques dans les eaux et de libérer des quantités équivalentes d'autres cations.

Les travaux de Saeedi et al (2004) montrent clairement la capacité élevée des sédiments à adsorber les métaux surtout sous forme dissoute selon un ordre croissant : Cu (2200 mg/kg) > Mn (2000 mg/kg) > Ni (1400 mg/kg) > Zn (320 mg/kg). D'autres travaux (Tessier et al., 1996) ont montré que même les complexes métalliques peuvent être adsorbés.

L'adsorption des ETM est affectée par plusieurs variables (Rollin et al., 2006) :

- Le pH, constituant la variable essentielle lors de l'étude de l'adsorption,
- La présence de cations majeurs concurrents (exemple  $\text{Ca}^{2+}$  avec le  $\text{Pb}^{2+}$  ou le  $\text{Cu}^{2+}$ ),
- La charge et la concentration des métaux,
- L'aire disponible.

#### • La désorption/ remobilisation

Les métaux adsorbés ne restent pas fixés définitivement sur les particules. En effet, ces métaux peuvent par la suite être résorbés, par détachement de la surface de la particule suite à un changement des paramètres physicochimiques du milieu (pH, salinité, température, etc.), ou suite à l'échange cationique entre les sédiments et l'eau.

La remobilisation ainsi que le recyclage des ETM dans les couches de surfaces des sédiments fluviatiles constituent d'importants processus dans le cycle géochimique de ces éléments. Parmi les principaux facteurs pouvant causer la remobilisation des ETM, on distingue :

#### - Le potentiel redox

Le changement des conditions redox qui s'effectuent, en général, en dessous de la surface du sédiment, conduit principalement à la réduction des oxydes de Fe et Mn (Figure 4), et par conséquent à leur mise en solution y compris les oxydes et des métaux associés pouvant migrer, ainsi, vers la surface (Morgan et Stumm, 1964).

#### - Le pH

La diminution du pH peut provoquer une dissolution des carbonates et des hydroxydes ainsi que leur métaux associés, et /ou à une désorption des cations métalliques, par compétition entre les protons H<sup>+</sup> et les cations métalliques rencontrés en surface. Généralement, la libération des ETM s'effectue à un pH=6,5 (Reece et al., (1987).

Une acidification du milieu entraînera la dissolution des carbonates mobilisant les ETM co-précipités comme le Mn, Fe, Co ou Cd. Tandis qu'un pH alcalin limite le passage des métaux lourds de la phase solide à la phase aqueuse (Makhoukh et al., 2011).

Le pH est l'un des facteurs naturels les plus importants contrôlant la mobilité des ETM à l'interface eau-sédiment. La baisse de pH entraîne une augmentation drastique de la solubilité des métaux lourds et de leur mobilité (Salvarredy, 2008).

Il existe un pH au-dessus duquel les métaux sont brusquement relargués (Tableau 3), ce pH est différent selon le métal en question (Duchaufour, 1995, Smedley et Kinniburgh, 2001, Gervais, 1999).

**Tableau. 3 : pH de relargage des ETM**

<b>ETM</b>	<b>pH</b>
Cd	06
Cu	05
Pb	04
As	05
Zn	05

#### - **La matière organique**

La matière organique est constituée de biomolécules telles que les acides organiques, les amines ou les polysaccharides produits par les microorganismes ainsi que les substances humiques, provenant des sols avoisinants.

Des complexes très stables et solubles avec les métaux lourds adsorbés sont formés suite à l'apport de substances organiques dissoutes, naturelles ou synthétiques. Les acides organiques naturels, et en particulier les acides humiques, possèdent une grande capacité de séquestration et de solubilisation. La stabilité des complexes *métal-acide humique*, dans les eaux, est plus élevée que celle des complexes métalliques inorganiques (Reuter et Perdû, 1977).

Au niveau de l'interface eau-sédiments, la matière organique est d'abord oxydée par l'oxygène dissous puis par les nitrates ce qui modifie la composition chimique des sédiments et de l'eau interstitielle (Gabelle, 2006). Ces réactions d'oxydation de la matière organique particulière entraînent la mobilisation des ETM qui y étaient initialement associés.

#### • **L'oxygène**

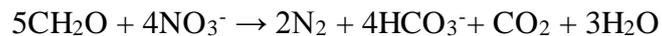
C'est le premier oxydant à être activement consommé dès l'interface eau/sédiment. Sa réduction constitue ainsi la première étape de la dégradation de la matière organique selon la réaction suivante :



La profondeur de pénétration de l'oxygène dépend avant tout de la quantité de matière organique présente. Ainsi, dans les sédiments de rivières, riches en matière organique, l'oxygène est très vite consommé pour participer à la dégradation de la matière organique et disparaît souvent dès les premiers millimètres. Un autre oxydant va alors intervenir, les nitrates.

- **Les nitrates**

L'azote est apporté au sédiment par la matière organique. Cet azote organique conduit, par hydrolyse, à la production de l'ion ammonium, qui à son tour, est oxydé par les bactéries en nitrite puis en nitrate. Si le milieu est réducteur, les nitrates sont réduits en azote gazeux par les bactéries dénitrifiantes. La réduction des nitrates s'accompagne d'une oxydation du carbone organique selon la réaction suivante :



Dans les sédiments fluviaux, la dénitrification est souvent limitée aux centimètres supérieurs. Les nitrates sont complètement réduits dès les 2 à 3 premiers cm étant donné le faible flux des nitrates de la colonne d'eau vers le sédiment.

## **II.6. Teneurs**

Les teneurs en ETM dans les sédiments dépendent de plusieurs paramètres (Bouabdli et *al.*, 2004) :

- La forme et la source des apports primaire,
- Caractéristiques physico-chimiques de la rivière,
- La nature et granulométrie des sédiments,
- Apport de sédiments à partir d'affluents,
- Teneur en matière organique,
- Composition minéralogique.

Selon Baize (2006), Les teneurs totales en ETM permettent un suivi dans le temps des mesures dans une même localisation, ce qui permet de constater par la suite si on a un accroissement, diminution, ou stabilisation de ces teneurs dans le sédiment.

Les teneurs totales sont facilement interprétables, quelle que soit les conditions de prise d'échantillon (pH, Eh, granulométrie, température, etc.), Par conséquent, elles ne permettent pas de différencier les formes chimique d'un métal, car des formes peuvent exister seulement suite à l'activité anthropique (assez réactives), d'autre naturelle (inertes), tandis que les teneurs totales, représentent toutes les formes du minérale.

Pour évaluer l'impact d'un métal lourd dans l'environnement, sa seule présence n'est pas suffisante. Cet impact est potentiel si le métal donné se trouve à des niveaux de concentrations anormalement élevées par rapport au fond géochimique (Alloway et Ayres, 1997). C'est pour cette raison qu'il faut bien connaître le fond géochimique, essentiel pour déterminer la contamination en métaux lourds causée par l'activité minière (Runnels et *al.*, 1992).

### III. Exploitation minière et impacts sur l'environnement

#### III.1. Introduction

L'exploration minière est, dans le cycle minier, la première série d'activité liée à l'exploration et à la prospection d'un terrain à la recherche des métaux et des minéraux. Elle constitue une activité économique extrêmement importante, en même temps, les risques et les impacts sur l'environnement inhérents à cette activité ne sont pas négligeables.

L'activité minière, à plusieurs étapes de son développement, affecte à divers degrés l'environnement et généralement de façon irréversible. Elle induit inévitablement la décadence de l'écosphère. Les mines abandonnées sans réhabilitation constituent assurément pour leur part des sources de contamination et de nuisance pour l'environnement. C'est pourquoi dès le début des opérations et aussi même après la cessation des opérations, il faut que chaque intervenant prenne ses responsabilités.

#### III.2. Les types d'exploitations minières

L'industrie minière constitue un des secteurs les plus importants de l'économie mondiale en générale et de l'économie marocaine plus particulièrement.

À l'échelle globale, les activités minières et les déchets associés ne constituent pas l'une des principales sources d'émission des métaux vers les cours d'eaux ou les sols (Nriagu et Pacyna., 1988). Pourtant, à l'échelle locale ou régionale, les activités minières et leurs déchets peuvent être une source majeure de métaux. Les contaminations peuvent ainsi être importantes et perdurer plusieurs siècles après la fermeture des mines. (Hakkou et *al.*, 2008). L'extraction des minerais peut se faire de deux façons, soit en mines souterraines, soit en mines à ciel ouvert. Le choix de l'une ou l'autre est fonction de la topographie, de la géométrie, de la morphologie du gisement et la nature de la roche encaissante (El Adnani, 2008).

##### III.2.1. Mine souterraine

Celle-ci peut être représentée comme une immense fourmilière qui consiste en un système de tunnels **verticaux et horizontaux** permettant d'atteindre le gisement minier à extraire.

Ce type est utilisé lorsque le gisement est profond. Les taux de production de ce type d'exploitation sont d'habitude plus faibles que par la méthode à ciel ouvert en raison des contraintes de production liées à l'exploitation en souterrain. Pour rentabiliser la mine, il est essentiel d'avoir des teneurs en métaux importantes dans le minerai (Villeneuve et *al.*, 2003).

##### III.2.2. Exploitation de surface

L'exploration de surface constitue la deuxième catégorie. Aujourd'hui ce type d'exploitation représente 60% des mines d'extraction à travers le monde. Ce type d'exploitation est nécessaire lorsque le **gisement est très étendu** car il est localisé près de la surface et recouvert d'une couche relativement mince de mort-terrain ou de roches stériles.

L'exploitation consiste en un décapage des sols et/ou un creusage par dynamitage, permettant ainsi d'enlever successivement des couches du sol qui sont ensuite transportées pour extraire de la roche les minéraux voulus par divers procédés, mécaniques et/ou

chimiques. Cette méthode est utilisée lorsque les gisements de minerais se trouvent près de la surface du sol car elle est plus économique que l'exploitation par mine souterraine. Ces mines dites "à ciel ouvert" produisent 8 à 10 fois plus de déchets et de résidus que les mines souterraines. Cette catégorie regroupe :

- les mines à ciel ouvert, qui consiste en l'extraction de métaux de roches dures,
- les carrières, d'où sont extraits divers matériaux de construction tels que le gravier et le sable,
- les mines de lixiviation, qui utilisent des produits chimiques, tels que l'acide sulfurique pour le cuivre et le cyanure ou le sodium pour l'or, afin de séparer les métaux des minerais.

### **III.3. Phases et opérations d'exploitation**

De la découverte du gisement jusqu'à la production du métal, les démarches mise en œuvre sur un site minier peuvent se dérouler en plusieurs étapes.

Chacune des étapes d'exploitation peut être génératrice de résidus miniers. Ces derniers présentent généralement des caractéristiques physico-chimiques différentes et donc des impacts environnementaux potentiels assez différents.

Outre les rejets solides, l'activité minière peut générer également des rejets liquides. Il s'agit des eaux provenant des pompages de la mine (eaux d'exhaure) et celles utilisées lors du traitement de minerai. Ces dernières peuvent être riches en réactifs de traitements n'ayant pas été consommés lors du procédé, en métaux ainsi qu'en matière en suspension.

#### **III.3.1. Prospection**

Un projet minier peut commencer seulement quand on connaît l'extension et la valeur du dépôt de minerai. Les informations sur la localisation et la valeur du dépôt de minerai s'obtiennent durant la phase de prospection. Cette phase comprend les enquêtes, les études de terrain, les essais de sondage et d'autres excavations exploratoires. La phase de prospection peut entraîner le nettoyage de vastes aires de végétation pour faciliter la circulation de véhicules lourds transportant les installations de forages.

#### **III.3.2. Développement**

Si la phase d'exploration prouve l'existence d'un dépôt de minerai assez important et d'une teneur suffisante, le promoteur de projet peut alors commencer de planifier le développement d'une mine. Cette phase du projet minier comprend plusieurs composantes distinctes.

#### **III.3.3. Construction de routes d'accès**

La construction de routes d'accès, soit pour amener les équipements lourds et les approvisionnements au site minier ou bien pour expédier les métaux et minerais traités, peut engendrer des impacts environnementaux substantiels spécialement si les routes d'accès sont construites à travers des zones écologiquement sensibles ou près de communautés précédemment isolées.

### **III.3.4. Préparation et déblaiement du site**

Si le site d'une mine se situe dans une zone sous-développée et difficile d'accès, le promoteur du projet peut avoir besoin de commencer le déblaiement des terrains pour la construction des zones de campement pour héberger le personnel et stocker les équipements.

### **III.3.5. Extraction du minerai**

Après qu'une compagnie minière ait déplacé les morts terrains, l'extraction du minerai commence à l'aide d'équipements lourds et d'une machinerie spécialisés, tels que les chargeurs, les wagons de mine et les camions-benne, qui transportent le minerai vers les installations de traitement à travers des routes de transport des matériaux.

### **III.3.6. Evacuation des résidus**

Les minerais métalliques à haute teneur sont composés presque entièrement de matériaux non métalliques et contiennent souvent des métaux toxiques indésirables. Le processus d'enrichissement génère de gros volumes de déchets appelé 'résidus,' c'est à dire les rejets issus du broyage d'un minerai auxquels les métaux désirés ont été extraits.

Si un projet minier implique l'extraction de quelques centaines de millions de tonnes métriques de minerai, le projet de mine générera une quantité similaire de résidus. La manière dont une compagnie minière dispose de son important volume de matériau de déchets toxique est l'une des questions centrales qui détermineront si un projet minier proposée est acceptable du point de vue environnemental. A long terme, l'objectif primordial de la gestion et de l'entreposage des résidus est d'empêcher la mobilisation et le dégagement dans l'environnement des constituants toxiques des résidus miniers.

## **III.4. Notion d'impact sur l'environnement**

L'impact environnemental désigne l'ensemble des modifications qualitatives, quantitatives et fonctionnelles de l'environnement (négatives ou positives) engendré par un projet, un processus, un procédé, un ou des organismes et un ou des produits, de sa conception à sa "fin de vie".

Parmi les activités ayant un impact sur l'environnement à une échelle relativement importante figure l'activité minière. L'impact de cette activité sur un site est évalué en comparant les valeurs obtenues à une gamme de valeurs naturelles, mais aussi en les rapprochant d'un fond géochimique naturel. En effet, les minéralisations font naturellement partie du substratum et crée une « anomalie naturelle » (Handbook Geochemistry, 1977).

Les différents aménagements pour les rejets ainsi que le type de rejet peuvent avoir des impacts variables sur les trois compartiments constitutifs de l'environnement à savoir l'air, l'eau, et le sol. L'impact qu'un résidu minier peut avoir sur l'environnement dépend essentiellement de la capacité polluante potentielle des substances qu'il contient ainsi que l'éventuel mouvement dans l'espace de ces substances.

La notion d'impact environnemental ne prend tout son sens que si elle inclut un changement des paramètres environnementaux, suite à l'activité minière. Ces paramètres qui régissent la qualité de l'environnement, peuvent avoir plusieurs composants :

- la qualité esthétique visuelle,
- la composition chimique des eaux, sols,

- la diversité biologique.

### **III.5. Les impacts de l'exploitation minière sur l'environnement**

L'exploitation minière quelle que soit son type (à ciel ouvert ou souterraine) a des répercussions négatives sur l'environnement, elle provoque inévitablement des modifications du milieu naturel. Les impacts environnementaux d'une exploitation minière varient considérablement en fonction de plusieurs facteurs tel que : la situation topographique du gisement, le type de minerai exploité, le type de gisement, le type et la méthode d'exploitation minière, la nature géologique de l'encaissant, la géométrie et la morphologie du gisement et bien d'autres facteurs (El hachimi, 2006).

### **III.6. Impacts sur les ressources en eaux**

Les effets sur la qualité de l'eau et de la disponibilité des ressources en eau dans la zone du projet constituent peut-être l'impact le plus important d'un projet d'exploitation minière.

Les questions clés sont de savoir si les fournitures en eau de surface et en eaux souterraines resteront appropriées à la consommation humaine, et si la qualité des eaux de surface dans la zone du projet restera adéquate pour supporter la vie aquatique et la faune terrestre native.

#### **III.6.1. Le drainage minier acide (DMA) et la lixiviation des contaminants**

Lorsque des matériaux minés (tels que les parois des mines à ciel ouvert et des mines souterraines, les résidus, les déchets rocheux et les matériaux lessivés déversés) sont excavés, exposés à l'eau et à l'oxygène, des acides peuvent se former si les minéraux sulfurés sont abondants et s'il y a une quantité insuffisante de matériaux neutralisants pour contrebalancer la formation d'acide. L'acide, à son tour, lessivera ou dissoudra les métaux et autres contaminants dans les matériaux minés et formera alors une solution acide, à forte teneur en sulfate et riche en métal (y compris les concentrations élevées de cadmium, de cuivre, de plomb, de zinc, d'arsenic, etc.).

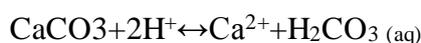
Le drainage des acides et des contaminants de lixiviation est la plus importante source d'impacts sur la qualité de l'eau liés à l'extraction des minerais métalliques.

#### **III.6.2. Le drainage minier neutre (DMN)**

L'acidité générée par l'oxydation des minéraux sulfurés peut être tamponnée, on parle alors de Drainage Minier Neutre (DMN), cette neutralisation se fait de deux façons :

- Par l'eau, lorsque celle-ci possède une charge alcaline suffisante (fortes concentrations en bicarbonates),
- Par la dissolution de certains minéraux (Banks et *al.*, 1997).

Les carbonates sont les principaux minéraux responsable du DMN, selon Collon (2003), surtout la calcite, la neutralisation de l'acidité se passe suivant la réaction suivante :



$\text{H}_2\text{CO}_3 \text{ (aq)}$  peut par suite se décomposer, sous la présence d'une phase gazeuse :



Selon El Hachimi (2006), La présence de ces minéraux carbonatés ralentie considérablement la vitesse de solubilisation des ETM, les eaux par la suite, même si elles sont chargées en sulfates de métaux, gardent un pH neutre, voire même alcalin.

Selon Collon (2003), d'autres minéraux, peuvent aussi neutraliser l'acide produit par l'oxydation des minéraux sulfurés. Ces réactions sont à l'origine de la mise en solution de K, Mg, Na, Al, Ca et localement de Fe.

- K-Feldspath :  $2\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2\text{K}^+ + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_5 + 4\text{SiO}_2$  (1)
- Chlorite:  $\text{Mg}_2\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4 + 4\text{H}^+ + \text{SiO}_2 \leftrightarrow 2\text{Mg}^{2+} + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2\text{H}_2\text{O}$  (2)
- Kaolinite:  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 6\text{H}^+ \leftrightarrow 3\text{Al}^{3+} + 2\text{SiO}_2 + 5\text{H}_2\text{O}$  (3)

### **III.6.3. L'érosion des sols et des déchets miniers dans les eaux de surface**

Pour la plupart des projets miniers, le potentiel d'érosion de sol et de sédiments dans l'eau de surface et la dégradation de la qualité de celle-ci est un grave problème.

En raison de la grande superficie de terre endommagée par l'exploitation minière et des grandes quantités de matériaux qui sont exposées sur les sites, l'érosion peut être une préoccupation majeure sur les sites miniers.

Les types d'impacts associés à l'érosion et à la sédimentation sont nombreux; produisant généralement des impacts tant à court terme qu'à long terme. Dans les eaux de surface, des concentrations élevées de particules dans la colonne d'eau peuvent produire des effets toxiques à la fois chroniques et aigus.

Les sédiments déposés en couches dans les plaines inondables ou les écosystèmes terrestres peuvent produire de nombreux impacts associés aux eaux de surface, aux eaux souterraines et aux écosystèmes terrestres.

### **III.6.4. Impacts des bassins de décantation de résidus, de déchets de roche, de la lixiviation en tas et des installations de stockage de lixiviats**

Les impacts des bassins de décantation des résidus de mine, des déchets de roche, de la lixiviation en tas et des installations de stockage de lixiviats sur la qualité de l'eau peuvent être graves.

Ces effets comprennent la contamination des eaux souterraines en dessous de ces installations et des eaux de surface. Les substances toxiques peuvent alors lessiver à partir de ces installations, filtrer à travers le sol et contaminer les eaux souterraines, surtout si la base de ces installations n'est pas équipée d'un revêtement imperméable.

### **III.6.5. Impacts de l'exhaure des mines**

Lorsqu'une mine à ciel ouvert intercepte la nappe phréatique, les eaux souterraines envahissent le puits. Pour poursuivre les travaux d'exploration, les compagnies minières doivent pomper cette eau vers un autre endroit, le pompage et le déversement des eaux provoque un ensemble unique d'impacts environnementaux.

Le prélèvement des eaux souterraines et les impacts associés aux eaux de surfaces et les terres marécageuses environnantes peuvent être une préoccupation sérieuse dans certaines régions.

Les impacts du prélèvement des eaux souterraines peuvent inclure la réduction ou l'élimination de l'écoulement de l'eau de surface, la dégradation de la qualité des eaux de surface et des usages bénéfiques qui y sont associés.

### **III.6.6. Impacts des projets miniers sur la faune**

La faune est un terme général qui fait référence à tous les animaux qui ne sont pas domestiqués. L'exploitation minière a une incidence sur l'environnement et les biotopes associés par le biais de la suppression de la végétation ainsi que le sol de couverture, le déplacement de la faune, le dégagement de polluants et la génération de bruit.

### **III.6.7. Impacts des projets miniers sur la qualité du sol**

L'exploitation minière peut contaminer les sols sur de vastes zones. Les activités agricoles proches d'un projet d'exploitation minière peuvent être particulièrement touchées.

Les opérations minières modifient régulièrement le paysage environnant en exposant des sols qui étaient précédemment intacts. L'érosion des sols exposés, les minerais extraits, les terrils et les matériaux fins dans les tas de déchets de roches peuvent entraîner des charges substantielles de sédiments dans les eaux de surface et les voies de drainage des eaux. En outre, les déversements et fuites de matières dangereuses et les dépôts de poussières contaminées fouettées par le vent peuvent conduire à la contamination du sol.

## **Chapitre II : Présentation du site d'étude**

## I. Cadre géographique

Situé à l'Est du royaume, le bassin versant de la Moulouya s'étend sur 57 500 km<sup>2</sup>, couvrant à peu près la totalité du Maroc oriental.

Géographiquement, il s'inscrit entre les latitudes 32°18' et 35°8' Nord et entre les longitudes 1°11' et 5°37' Ouest.

Le bassin draine les eaux du Rif oriental et du Moyen Atlas à l'Ouest, et du Haut Atlas au sud, il est limité au Nord-Ouest par les bassins méditerranéens, à l'Ouest par le bassin de l'Oued Sebou, au Sud-Est par le bassin de l'Oued Guir, à l'Est par le territoire Algérien, et au Sud par le bassin de l'Oued Ziz.

Sur le plan morphologique, dès l'amont, la Moulouya parcourt des zones de plaine sur une longue distance, alors que les zones de montagne fournissent l'eau et les sédiments par l'intermédiaire de ses nombreux affluents (Snoussi, 2005).

Le bassin versant de la Moulouya comprend 3 sous-bassins, subdivisés suite à plusieurs accidents géologiques, du sud vers le nord : la Haute, la Moyenne, et la Basse Moulouya.

La haute Moulouya, où se situe le district minier de Zeïda, s'étend sur une superficie de 4500 km<sup>2</sup> dont 85% de plaines et 15% de montagnes (Aharmouni, 1996), elle constitue la partie amont du bassin versant de la Moulouya. Elle se présente sous forme d'une cuvette intra montagne, de forme triangulaire, et encadrée par les reliefs moyen atlasique et haut atlasique (Saadi, 2012).

L'altitude varie de 1200 à 1500 m dans la dépression et culmine à 3757 m au jbel Ayachi dans le Haut atlas (Oukemeni, 1993).

L'Oued Moulouya prend naissance à la jonction de ces deux chaînes de l'Atlas, et draine tout le bassin versant jusqu'à son embouchure sur la méditerranée, son principal affluent est l'oued Za.

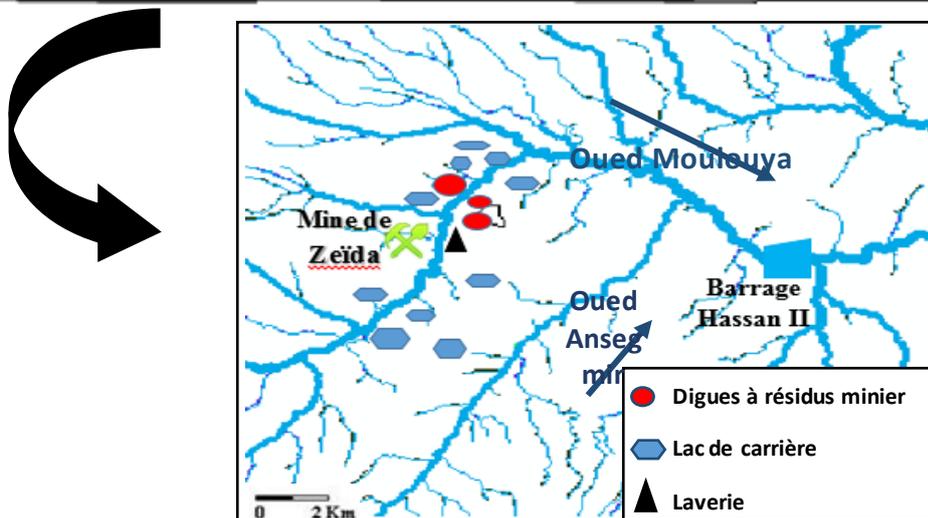
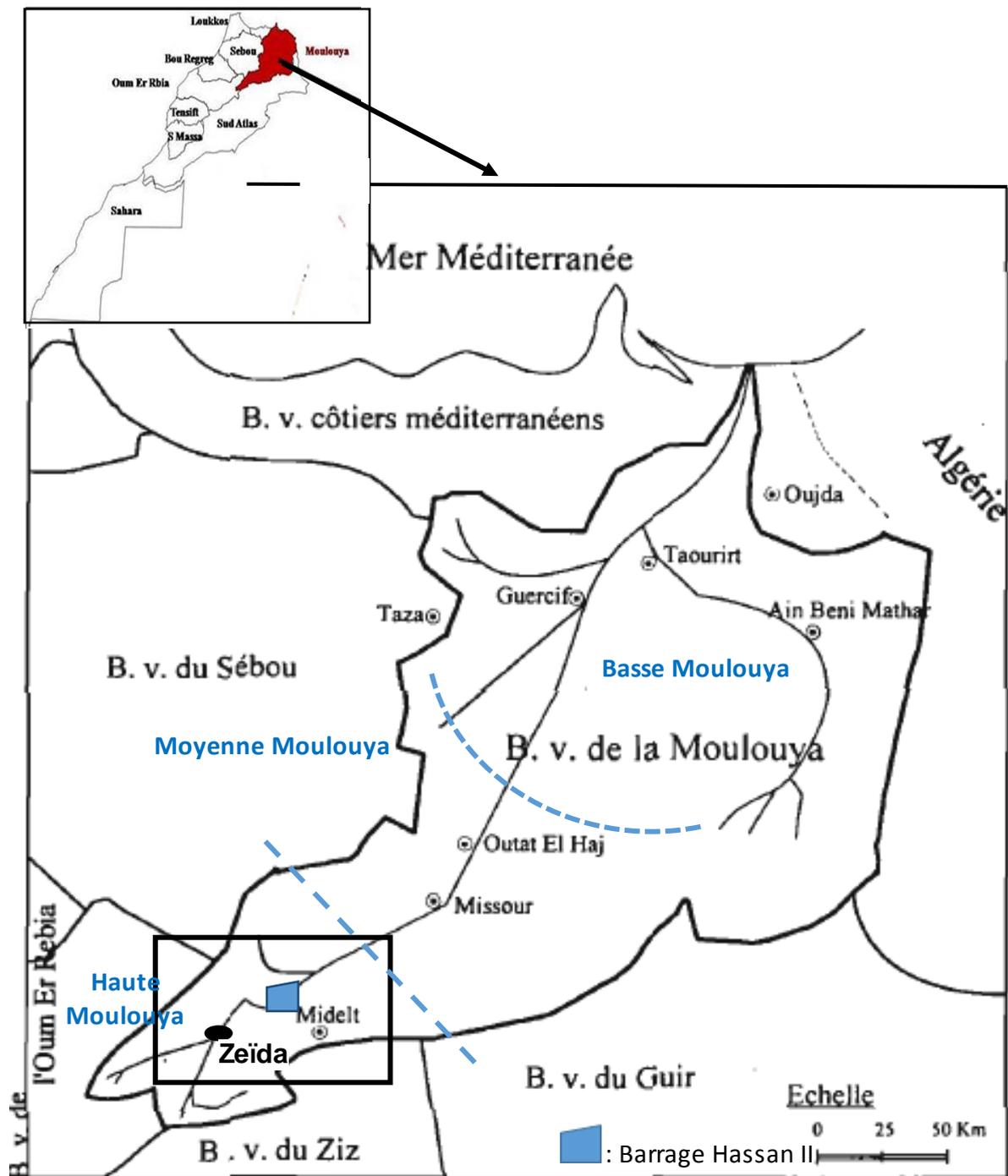
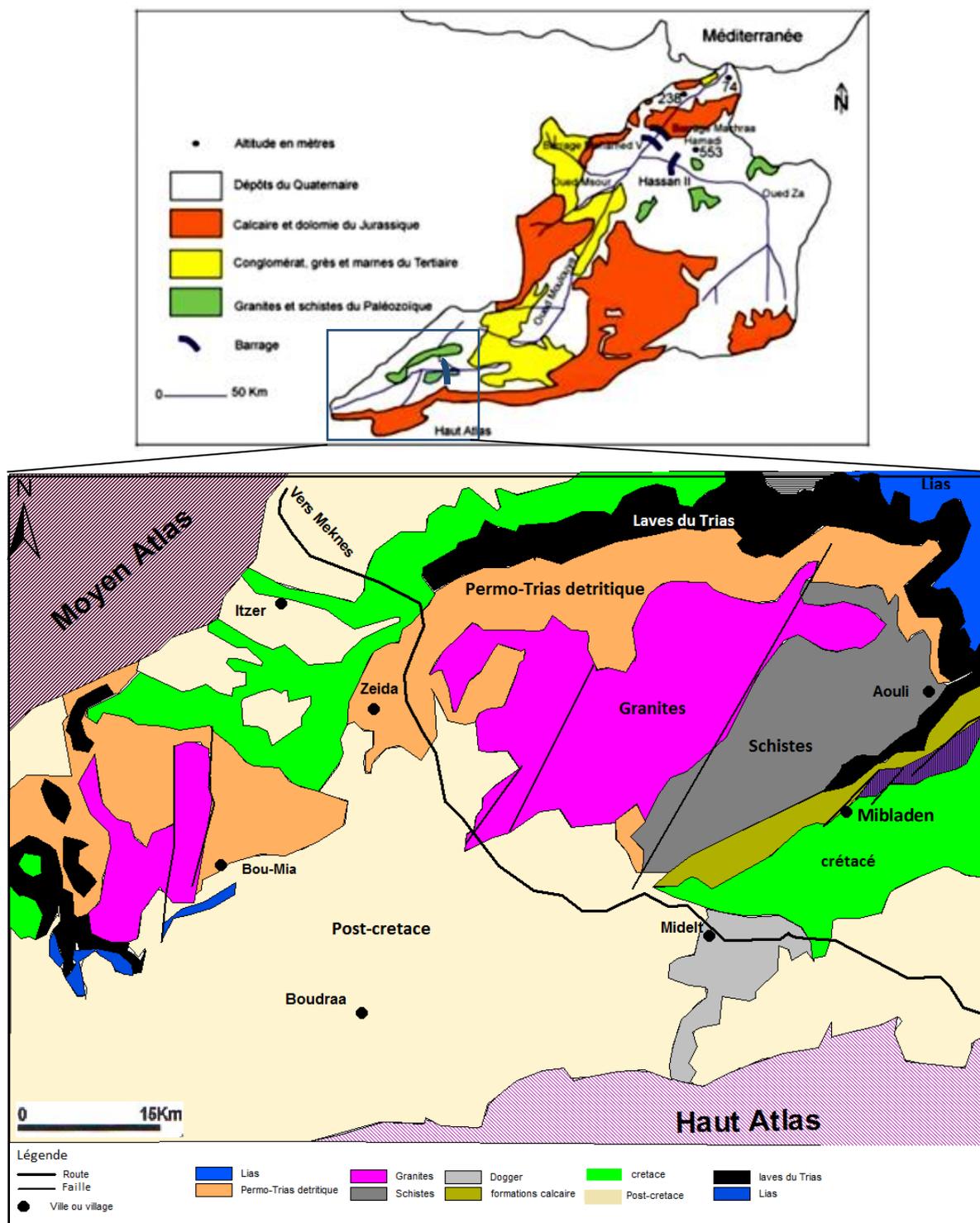


Figure.5 : Localisation géographique de la zone d'étude

## II. Contexte géologique et structural

La haute Moulouya, appartenant au domaine atlasique (Michard, 1976), se situe dans la partie occidentale de la meseta oranaise, ayant la forme d'un plateau aride et tabulaire et limitée par les chaînes plissées du haut atlas au Sud et du moyen atlas au nord.

Plusieurs formations, d'âges différents, affleurent dans la haute Moulouya, allant du paléozoïque, formant le socle, jusqu'au quaternaire.



**Figure.6** : Carte géologique schématique de la Haute Moulouya et ses bordures atlasiques (Emberger, 1965, modifiée par Naji, 2004)

## II.1. Le socle paléozoïque

Le socle paléozoïque est constitué de deux ensembles différentes : schistes métamorphiques et des granites mise en place lors de l'orogénèse hercynienne (Laville et *al.*, 1991), ils affleurent dans la haute Moulouya formant les massifs primaires de Boumia à l'Ouest et d'Aouli à l'Est (Riad, 2003).

D'après (Saadi 2012), les principales caractéristiques des deux boutonnières :

- La boutonnière Zeïda-Aouli :

Le massif granitique d'Aouli, à la limite occidentale, affleure au sein des schistes sur environ 260 Km<sup>2</sup>.

La boutonnière Zeïda-Aouli est caractérisée essentiellement par le paleoseuil de la Haute Moulouya, le socle cambrien y affleurant est découpé par un réseau de fracture NS à NNE-SSW, sa couverture forme les plateaux de Douira-Anjil, représentée essentiellement par des argilites triasico-liasiques et crétacé.

- La boutonnière de Boumia :

Le massif granitique de Boumia, à la limite orientale, affleure sur environ 65 km<sup>2</sup>.

Dans la boutonnière de Boumia affleure le socle paléozoïque granité et disposé en seuil, ainsi que des dépôts triasico-liasiques, de large plateaux et cuestas carbonatées ceinturent la boutonnière.

Cependant, même si ces deux boutonnières sont distantes d'une vingtaine de kilomètres, elles forment, au-dessous de la couverture, un seul massif granitique dont la superficie minimum serait de 700 Km<sup>2</sup> (Diot et Bouchez, 1989).

## II.2. La couverture du socle

Le socle paléozoïque est surmonté, en discordance, par une couverture subtabulaire, constituée à la base par des formations détritiques rouges et des épanchements de laves permo-triasiques (figure 7), surmontés à leur tour par une sédimentation détritique et carbonatée du Jurassique et Crétacé (Emberger, 1965).

- **Le Trias**

Représenté par des marnes, des dolérites, des argiles rouges et des basaltes, le Trias affleure en continuité entre les 2 boutonnières, cette formation repose des fois directement sur les schistes paléozoïques sans intermédiaire de bas conglomératique (Amrani, 2007).

- **Le Jurassique**

Affleurant sur les bordures du Haut Atlas et du Moyen Atlas, et à l'Ouest des Hauts plateaux, le jurassique est représenté par des formations appartenant à des âges différents (Amrani, 2007):

Le lias inférieur : au cours du lias inférieur, de puissantes séquences dolomitiques et calcaro-dolomitique, surmonté de marnes et d'argiles, se déposèrent au sein des failles limitant les deux sillons atlasiques, il affleure au Nord-Est du socle cristallin d'Aouli.

Le lias Moyen : représenté par une alternance de calcaires, calcaires dolomitiques et marnes grises, surmonté au sommet de la série, par une couche fine de calcaire rose, avec des intercalations d'argiles rouges.

Le lias supérieur : les sédimentations calcaire du cycle supérieur change, et parfois brusquement, vers un dépôt marneux terrigène (Dresnay, 1979), correspondant au remplissage des sillons marins.

Le dogger quant à lui, est constitué de dépôts calcaires et marno-calcaires à niveau argileux vers la base.

- **Le Crétacé**

Affleure le long du Haut Atlas entre le massif d'Aouli et Haut Atlas à l'Est de Midelt, présenté par des formations évaporitiques à caractère continental riche en faune du domaine littoral: lamellibranche, oursins, gastéropodes (Raynal, 1961), vu qu'au crétacé, la majeure partie du domaine atlasique était émergée, et quittait le domaine marin, les formations les plus abondantes sont les marnes, grès rouges et calcaire blancs.

- **Le tertiaire**

Le tertiaire affleure dans la haute Moulouya essentiellement sous forme d'argilite sableuses, des sables, et des calcaires (Riad, 2003).

- **Le quaternaire**

Etant la formation la plus récente, on rencontre le quaternaire au-dessus de toutes les précédentes formations, il occupe une grande superficie du bassin de la Moulouya et affleure sous forme de vaste plateaux constitués d'argile, de conglomérats et de limons.

Age		Log	Lithologie	Epaisseur (m)	
Quaternaire			Conglomérats et poudingues à lentilles de grès et d'argiles	100	
Néogène	Pliocène		Calcaires lacustres, marnes et argiles.	50	
	Miocène		Conglomérats grés-argileux	20	
Paléogène	Oligocène		Dolomies argileuses	100	
	Eocène sup.		Conglomérat, grès et marnes	80-150	
Crétacé	Turonien		Calcaire gréseux	100-130	
	Cénomane		Conglomérats, gravellites, argiles et marnes	110	
Jurassique	Dogger		Calcaires à niveaux argileux vers la base	280	
			Marnes à calcaires	20	
	Lias	Sup.			
		Moy.		Dolomies karstiques à intercalations marneuses	200
		Inf.		- Calcaires dolomitiques et dolomies à Hesperithyris. - Calcaire argileux-dolomies	200
Trias	Sup.		Shales grés-argileux. Argilites rouges supérieures	15 10-20	
	Inf.		Basaltes verts	100-200	
Paléozoïque			Argiles rouges inférieurs Cgts-grès-marnes-Arkoses	50	
			Schistes, quartzites et amphibolites		

**Figure. 7 :** Log stratigraphique synthétique de la Haute Moulouya et ses bordures atlasiques (Naji, 2004)

### II.3. Aperçu sur la minéralogie des roches dominantes dans la zone d'étude

L'Oued Moulouya ainsi que l'affluent Ansegmir traversent des formations quaternaires constituées essentiellement de granite, des grès, et d'argiles (Figure.7). Selon (Foucault et Raoult, 2010), les compositions des principales roches rencontrées dans la région sont :

- Le granite : Roche magmatique plutonique, constituant : 80 % de la roche quartz xénomorphe interstitiel, feldspath alcalin (orthose, microline), et plagioclase (albite, oligoclase) subautomorphe, les minéraux secondaires et accessoires sont très variés : mica, amphibole, pyroxène (rare), sphène, apatite, zircon, tourmaline...
- Le grès : Roche sédimentaire détritique terrigène composée à 85 % au moins de grains de quartz.
- Les argiles : Terme désignant soit un **minéral** (= minéral argileux) caractérisée par la superposition de feuillets composés de couches tétraédriques et de couches octaédriques (à base d'octaèdres de brucite  $Mg(OH)_2$  ou de gibbsite  $Al(OH)_3$ , exemple : chlorite, illite, smectite, kaolinite, soit une **roche** composée pour l'essentiel de ces minéraux

### III. Contexte climatique

Le bassin versant de la Moulouya, connaît un climat méditerranéen, semi-aride à aride, à faible précipitation, cependant, en raison de son vaste étendu, on distingue des mini climats variable dans ces différentes régions, essentiellement dû à l'altitude, et à la continentalité (Ibouhouten et *al.*, 2009).

Le climat montagneux règne dans la Haute Moulouya, passant au climat continental à la moyenne Moulouya, puis vers un climat méditerranéen au Nord-Est du bassin.

#### III.1. Précipitation

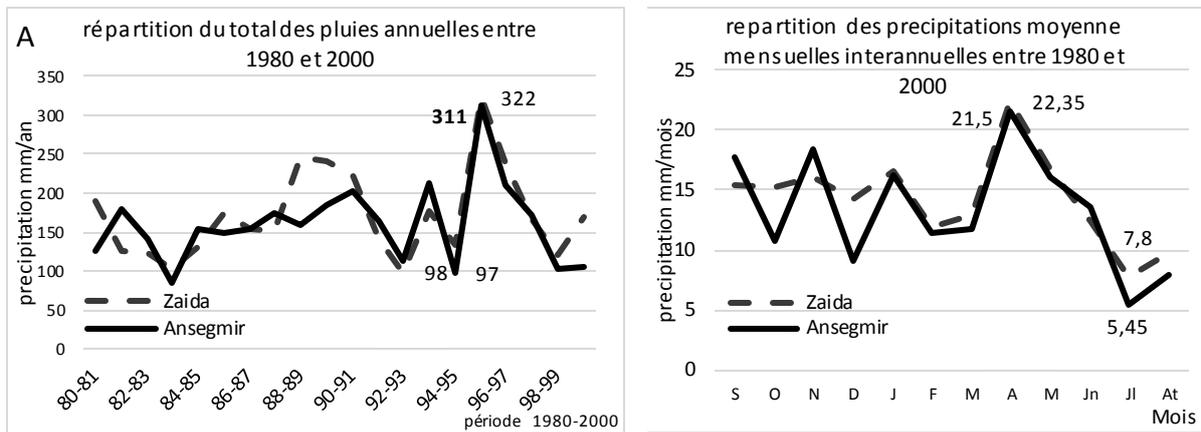
Les précipitations moyenne annuelle varient parallèlement à l'altitude, variable dans tout le bassin, mais tout de même faible (< 350mm /an). Elles peuvent diminuer à 100 mm/an durant les années sèches, et atteindre les 350 mm/an durant les années humides (figure 8-B). Le total pluviométrique moyen de 1980 à 2002 est 171,4 mm/an pour la station de Zeïda, et 160mm/an pour la station d'Ansegmir.

Le volume moyen annuel des précipitations est estimé à 1.400 millions de m<sup>3</sup> (DGH, 1971).

Au niveau des sommets les précipitations dépassent les 600mm/an, tandis qu'au plaine dépassent rarement les 350 mm/ an, par exemple, durant la même année, elles atteignent 660mm/an à Arhbala (1800m d'altitude) et diminuent à 206.4 mm à Zeïda (1470m d'altitude) (EL Hachimi, 2006).

Le régime des précipitations est variable durant toute l'année, les précipitations maximales sont observées au printemps (Avril-mai), les minimales en été (juillet – septembre, l'automne est humide tandis que l'hiver est sec (figure 8-A).

La neige reste l'une des principales sources d'alimentation des oueds du bassin par ruissellement et des nappes par infiltration, elle se précipite au-dessus de 1400m, exemple de Jbel Ayachi, cependant, elles ne persistent qu'au haut atlas et au moyen atlas, à une altitude au-dessus de 2000m.



**Figure.8** : Répartitions de pluies interannuelles et du total annuel à la station de Zeïda et d'Ansegmir durant la période 1980-2000

### III.2. Température

Durant la fin des saisons sèche, les pluies causent une érosion massive accompagnée d'un ruissèlement important des sols, amplifiée par l'absence de la végétation, ce qui accroît d'avantage le transport des métaux vers l'oued Moulouya.

Dans le bassin versant de la Moulouya, la température augmente au fur et à mesure qu'on s'éloigne du littoral. Cependant et contrairement aux précipitations, ses valeurs diminuent des basses aux hautes altitudes, c'est pourquoi, on observe pour la Haute Moulouya, caractérisée par ses hautes altitudes, des moyennes annuelles faibles durant toute l'année (12 à 14 °C) (EL Hachimi, 2006) comparée aux autres régions du bassin.

Les hivers sont souvent rigoureux, froid et long, où les pics de températures peuvent atteindre des valeurs négatives, tandis que l'été est très chaud, mais reste supportable grâce à la sécheresse de l'air.

Pour la haute Moulouya, les moyennes mensuelles maximales sont atteintes en juillet à aout, variant entre 18°C et 29°C, tandis que les moyennes minimales sont atteintes de décembre à janvier, avoisinant parfois les 2°C.

### III.3. Vent

Le Bassin versant de la Moulouya est caractérisée par deux types de vents dominant variant selon les saisons, en hiver, la région est affectée par des masses d'air froid et humide qui sont entraînée par des vents arrivant de l'Ouest, traversant les barrières moyenne atlasique et rifaine, tandis qu'en été, la région est affectée par des masses d'air chaud et sec des régions sahélienne, entraînée par deux vents dominants : le chergui arrivant de l'Est et le Sirocco arrivant du Sud (Ahamrouni, 1996).

La Haute Moulouya est aussi affectée par ces vents comme la totalité du bassin. L'action érosive des vents est d'autant plus amplifiée que le couvert végétal est réduit. La vitesse maximale des vents varie entre 20 et 50m/s au sol (EL Hachimi 2006).

### III.4. Evaporation

Le climat aride de la région engendre une forte évaporation des eaux, cette dernière varie dans tout le bassin, elle atteint les 2800 mm/an à Midelt, 4300mm/an a Missouri située dans la moyenne Moulouya.

L'évaporation est directement influencée par l'altitude, dans les montagnes, et durant la saison froide, les eaux ont le temps de s'infiltrer ou de couler, contrairement aux plaines, où l'évaporation est accentuée par un ensoleillement fort après chaque averse.

#### IV. Caractérisation hydrologique du réseau hydrographique du bassin de la Moulouya

Le bassin versant de la Moulouya, est le plus grand bassin hydrographique du Maroc, son réseau hydrographique draine la totalité des mines abandonnées situées sur les rives de son collecteur principale l'Oued Moulouya, et de ses affluents.

Dans la haute Moulouya, L'Oued Moulouya draine la mine de Zeïda vers le barrage Hassan II, la détermination des caractéristiques hydrographique et hydrologique du réseau est donc indispensable.

##### IV.1. Les eaux de surface de la Moulouya

Le réseau hydrographique de la Moulouya est très dense, caractérisé par une multitude d'affluents, et par son collecteur principale Oued Moulouya. L'écoulement superficiel de la Moulouya est très variable d'une année à l'autre, des débits de crues importants et des étiages faibles ou nuls (Melhaoui et Boudot, 2009).

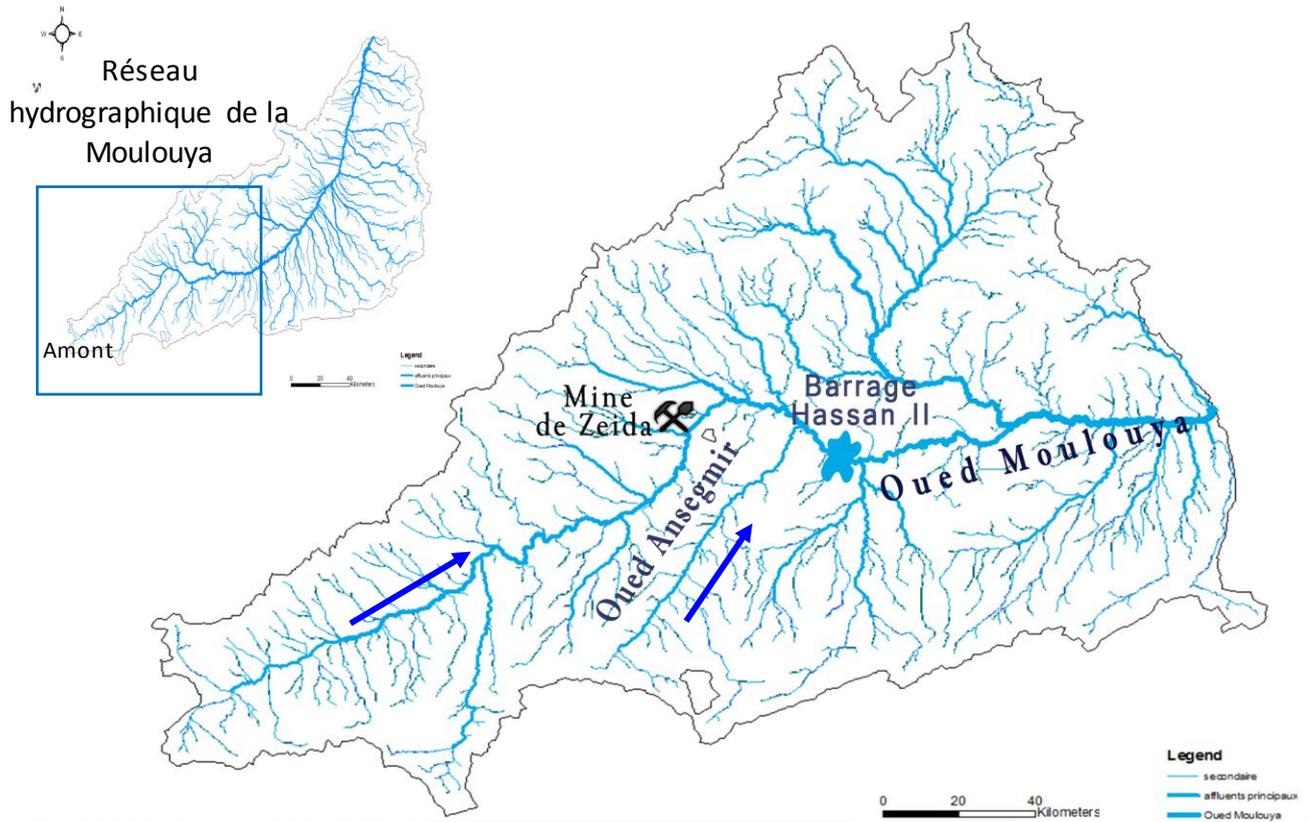


Figure. 9 : Le réseau hydrographique de la haute Moulouya réalisé à base d'MNT

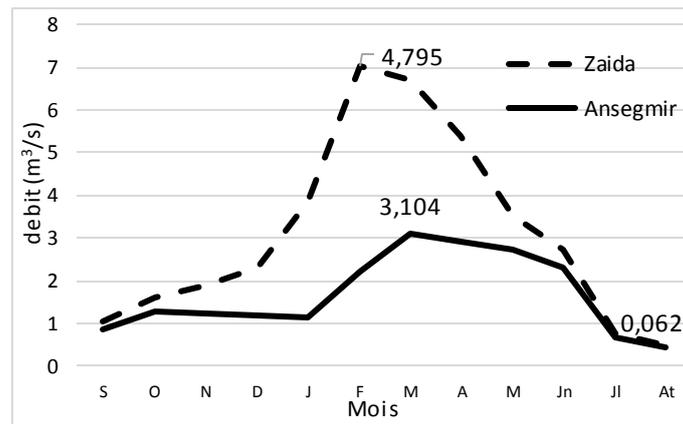
L'oued Moulouya, d'une longueur de 188 km, prend naissance à la haute Moulouya, à la jonction entre le haut atlas et le moyen atlas, il draine la totalité du bassin avant d'atteindre son embouchure en méditerranée.

Il creuse tout d'abord, une large vallée quaternaire, avant d'entailler successivement, les massifs granitique de Boumia et d'Aouli ainsi que les formations schisteuses et basaltique de la Haute Moulouya (Ahamrouni, 1996).

Caractérisé par un régime très irrégulier, les apports annuels de l'oued Moulouya varient entre 270 Mm<sup>3</sup> pour les années sèches, et 1200Mm<sup>3</sup> pour les années humides.

Le débit moyen annuel de l'Oued Moulouya est de 2.78 m<sup>3</sup>/s à la station hydrologique de Zeïda, et s'élève à 7.93m<sup>3</sup>/s à la station Missouri plus en aval de la haute Moulouya.

À la station de Zeïda, les moyenne des débits mensuelles les plus élevés sont observé pendant l'hiver (4,79m<sup>3</sup>/s) et les minimales en été (0,062 m<sup>3</sup>/s) au cours du mois d'août (Figure.10).



**Figure.10** : Répartition des débits moyens mensuelles interannuelles (m<sup>3</sup>/s) entre 1980 et 2000 à la station Zeïda et Ansegmir

Plusieurs affluents alimentent l'oued Moulouya. Dans la haute Moulouya, le principal, est l'oued Ansegmir, d'une longueur de 80 km. Il prend naissance au Haut atlas, et draine par la suite une superficie de 800km<sup>2</sup>, traversant des formations carbonatées d'âges mésozoïque et des formations quaternaires (Ahamrouni, 1996), alimenté essentiellement par la fonte des neiges, il joue le rôle de régulateur de la Moulouya (El Hachimi, 2006), surtout grâce à son écoulement pérenne.

La majorité des autres affluents possèdent un régime torrentiel, intermittent et sec durant la majeure partie de l'année, mais suite à des pluies importantes, et dû à l'imperméabilité du substrat, ces oueds entraînent une forte érosion de leurs lits et de leurs bassins versants causant des crues brutales et un transport important des matériaux vers l'Oued Moulouya. Ces crues peuvent durer de quelques heures à quelques jours (Melhaoui et Boudot, 2009).

- **Barrage Hassan II**

La zone d'étude se limite en aval par le barrage Hassan II (Photo.3), anciennement appelé Sidi Said (coordonnées X=558.900 Y=224.250), se situant à 12 km NW de Midelt. Ce barrage fut inauguré en octobre 2000 pour faire face à plusieurs problèmes de la région. Sa capacité est de 400 Mm<sup>3</sup> et un débit de 710 m<sup>3</sup>/seconde durant la période pluvieuse et 450 m<sup>3</sup>/seconde durant l'été (HCP, 2012). Il assure plusieurs fonction, l'alimentation en eau potable et la production de l'électricité, ainsi que :

- Le soutien du volume régularisé par le complexe Mohamed V - Mecharaa Hammadi pour l'irrigation des périmètres de la basse Moulouya.
- Protéger le barrage Mohammed V et les infrastructures en aval contre les crues et les inondations.
- Le développement de la petite et la moyenne hydraulique dans la moyenne Moulouya.
- Lutter contre l'envasement du barrage Mohammed V.

- **Les lacs de carrières**

Suite à l'exploitation minière du gisement de Zeïda, des carrières a dimensions immense ont été délaissées sans aménagement (Photo.2), ces carrières se sont par la suite remplies par des millions de mètre cubes d'eau issu des nappes et du ruissèlement. Ces eaux, en contact avec les terrils miniers argileux et la carrière métalliquement polluée, sont tout de même destinées à l'alimentation en eau potable de la région, sans traitement efficace.



**Photo. 2 :** Lac de carrière



**Photo. 3 :** Barrage Hassan II

#### **IV.2. Les eaux souterraines**

Le bassin hydrogéologique de la Moulouya renferme une trentaine de nappes d'importance qualitative et quantitative différente, dû à la variabilité des conditions dans tout le bassin, d'un point de vue géologique, climatique, et lithologique.

Selon le BHM, la recharge du système aquifère en Haute Moulouya-sillon itzer/enji atteint les 120Mm<sup>3</sup>/an. S'étendant sur 3300km<sup>2</sup>, le bassin comporte 5 aquifères principaux :

- Les nappes du mio-plio-quaternaire, totalisant un débit de 52Mm<sup>3</sup>/an, utilisée surtout pour l'irrigation via 12 sources (3Mm<sup>3</sup>/ an), cependant ces nappes sont vulnérables à la pollution,

- La nappe des calcaires du crétacé donne naissance à une quinzaine de sources, débitant une moyenne de 12.3Mm<sup>3</sup> /an pour l'irrigation de tout type,
- La nappe des calcaires bajociens, dont les débits de ses sources atteignent les 382l/s, destiné à l'irrigation, avec quelque forage pour l'alimentation en eau potable,
- L'aquifères calcaire du lias est aussi utilisé pour l'irrigation via 17 sources débitant 34Mm<sup>3</sup>/an, il joue un rôle important dans l'alimentation de l'Oued Ansegmir,
- Quant à la nappe des granites et argile gréseuses, son volume globale prélevé atteint 3.3Mm<sup>3</sup>/an, utilisé pour l'irrigation de 1330ha de terres agricoles.

## **V. Démographie et activités humaines**

### **V.1. Démographie**

La haute Moulouya compte, d'après le recensement général de la population et de l'habitat (2004), 151605 habitants ,dont 106824 habitant en milieu rural, et 44781 habitant dans la commune urbaine Midelt, le centre de Zeïda compte 4968 habitants, tandis que 4952 habitent dans le milieu rural.

Comme dans tout le bassin de la Moulouya, la population urbaine connaît un accroissement important, tandis que la population rurale, connaît une évolution très lente, voire un décroissement dans quelques région de la haute Moulouya (USAID, 2010), ceci essentiellement dû à :

- l'extension des périmètres urbains des grandes villes,
- l'émergence de nouveaux centres urbains,
- la migration des ruraux vers les villes.

### **V.2. Contexte économique**

L'agriculture et l'élevage sont les principales activités économique de la région, d'où l'usage intense des eaux surtout pour les cultures industrielles et l'arboriculture fruitière, et diverses activités industrielles concentrées dans les grandes villes.

L'agriculture a connu un véritable développement dans la haute Moulouya, surtout grâce au développement de la technique d'irrigation, et de l'alimentation en eau, par exemple, l'arboriculture du pommier dans la commune de Zeïda.

Les principaux types d'agriculture dans la haute Moulouya (Ahamrouni, 1996) :

- l'agriculture en bour : dépend uniquement des précipitations, mais reste tout de même limitée dû au faible leur faible taux,
- l'agriculture irriguée : se localise souvent aux rive des oueds, et se base sur la déviation de leurs eaux.

Les pesticides et engrais constituent une source de pollution non négligeable, surtout au niveau du périmètre de l'Oued Ansegmir, où on rencontre une multitude de zones d'exploitation de pommiers.

En ce qui concerne les régions arides, l'élevage des bovins, des ovins et des caprins (USAID, 2010) sur des terres de parcours d'alfa et d'armoïse, peut constituer la seule source de revenu pour les habitants.

La haute Moulouya comporte divers autres activités, agro-alimentaires, industrielles, mais d'importances mineures, surtout après la fermeture des mines de Mibladen, d'Aouli et Zeïda.

L'activité touristique, et malgré le potentiel touristique de la haute Moulouya, reste limitée dû au faible développement de la région, que ça soit l'alimentation en eau potable, l'électricité, le réseau d'assainissement, ou la difficulté d'accès a quelques zones dû à l'absence de routes.

## VI. Présentation de l'exploitation minière dans la région

### VI.1. Historique de l'exploitation minière dans la région

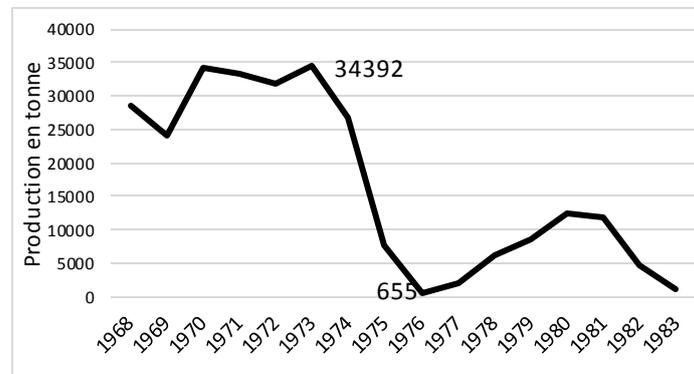
Les mines de la haute Moulouya (figure11), toutes à l'arrêt actuellement, depuis 1983 pour Aouli-Mibladen et 1986 pour Zeïda, constituaient le plus grand gisement plombifère du Maroc.

La mine de plomb d'Aouli est de type filonien, encaissée dans des schistes et des quartzites d'âge paléozoïque, la mine de Mibladen est stratiforme (type MVT), incrustée dans des couches marno-calcaire, celle de Zeïda aussi stratiforme (type redbed), encaissée dans des grès rouges du trias, (Mouttaqi et *al.*, 2011), l'ensemble forme le district plombifère de la Haute Moulouya, allongé EW et s'étalant sur 75 Km de long et 20 Km de large (Emberger, 1965).



Figure.11 : Situation géographique des mines de la haute Moulouya

Exploitées industriellement depuis le début du siècle, les mines d'Aouli-Mibladen ont été très actives dans les années 70, leur production était en moyenne de 30 000 tonnes/an de concentré plomb à environ 3% (Mouttaqi et al., 2011), entre 1973 et 1983, les deux mines auront produit 270 000 tonnes de concentré de plomb (Figure.12).



**Figure.12** : Production réalisée aux centres miniers Aouli-Mibladen de 1968 à 1983 (El Hachimi, 2006)

## VI.2. Le site minier Zeïda, historique et technique d'exploitation

### VI.2.1. Aperçu historique

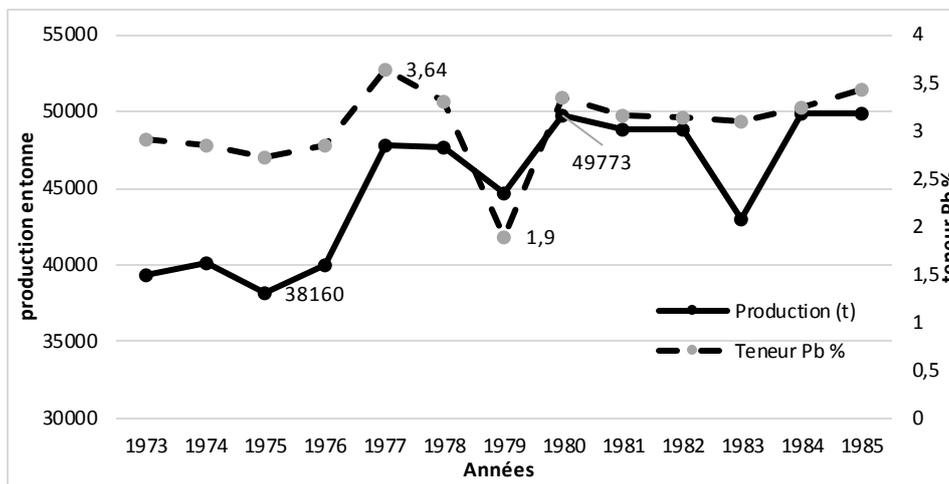
Le centre minier Zeïda s'étend sur une superficie de plus de 300km<sup>2</sup>, il se situe au carrefour de la route principale N°21 (Meknes-Errachidia) et de la route principale N°33 conduisant à Kasba Tadla, à 30 Km au NW de Midelt (Figure.10).

Le gisement de plomb de Zeïda fut découvert en 1958 par une équipe de BRPM, ce n'est qu'en 1960, après une série de sondages, qu'une laverie pilote fut installée. Les résultats furent très encourageant (concentré en Pb à 72.1%, et rejet titrant 0.4%) ce qui a poussé la BRPM à lancer une intense compagnie de recherche, qui a permis d'évaluer les réserves à 8 000 000 tonnes.

En 1966, la SODIM a été constituée par l'union de la BRMP et la société Zellidja. Cette société a continué les travaux de recherches en exécutant 90 000 mètres de sondages carottés durant la période 1972-1973, les résultats ont été très encourageants et ont permis de doubler les réserves, l'exploitation du gisement durera alors de 1972 jusqu'à la fermeture de la mine en 1985 (D.M.R, 1990).

➤ Le bilan de l'exploitation à Zeïda (Figure. 13) :

- Production d'environ 12 millions de tonnes de résidus de traitement stockés dans des haldes sur les berges de l'Oued Moulouya (D.M.R, 1990b),
- Production de 70 millions de tonnes de stériles de découverte, stockés sur les berges de l'Oued Moulouya,
- Production de 630 172 t de concentré de plomb à une teneur de 40 à 70%,
- Ainsi qu'une dizaine de carrières à ciel ouvert, actuellement remplies d'eau.



**Figure.13** : Teneurs en Pb de la Production réalisée au centre minier de Zeïda durant la période 1973-1985 (El Hachimi, 2006)

➤ La fermeture de la mine

Durant les années 1982, 1983 et 1985, la société SODIM rencontre de sérieux problèmes :

- L'effondrement du marché de plomb,
- L'épuisement des réserves économiquement exploitable,
- A l'augmentation des produits énergétique et de traitement,
- Diminution des prix de ventes comparés aux frais de la production.

C'est pourquoi, au cours du 1<sup>er</sup> semestre du 1985, la SODIM a décidé de fermer la mine.

### VI.2.2. Minéralisation du gisement de Zeïda

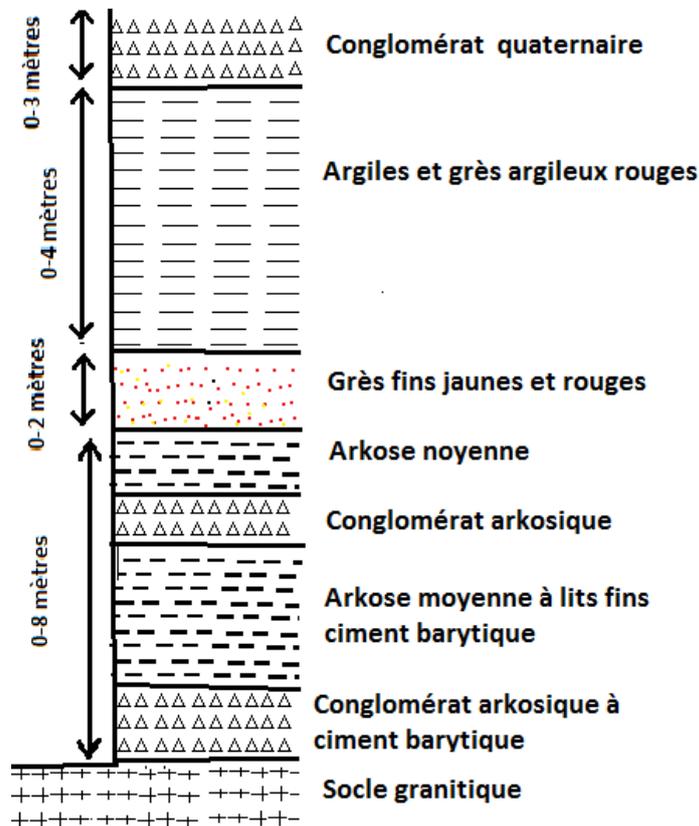
La minéralisation de Zeïda est de type imprégnation stratiforme (Amrani, 2007), encaissée dans des grès et arkoses du Trias transgressifs sur le granite, l'étendu et l'épaisseur de cet encaissant varient avec la topographie (Mouttaqi, A. et al., 2011).

Le minerai se manifeste sous forme d'un grès feldspathique, d'une arkose ou d'un conglomérat arkosique clair (Figure.14), cimenté par la barytine rose ou blanche, et de la silice (D.M.R, 1990).

la minéralisation, dont la teneur était supérieur à 2% en Pb (Figure.13), formée de cérusite a 70% et 30% de sulfure de plomb (galène), associés à la barytine rose très abondante et a des oxydes de Pb : anglésite, wulfénite et Vanadinite, (Schmitt, 1976), ajouté a ceci de faibles proportion de chalcopryrite, et de la pyrite sous forme de cristaux isolés (Amade, 1965). Ces minéraux occupent les interstices entre les grains de sable des arkoses.

La minéralisation s'étend vers le SW jusqu'à Boumia, et atteint ses concentrations maximales dans des paléo-chenaux (Amade, 1965).

Parmi les minéraux qui composent essentiellement le district minier Zeïda, on rencontre la galène, la blende, la barytine, la cérusite, la chalcosite, la chalcopryrite, la pyrite, la limonite, la goethite, etc. (Emberger, 1965).



**Figure.14** : Coupe type d'un panneau minéralisé à Zeïda (Schmitt, 1976)

### **VI.2.3. L'exploitation du gisement de Zeïda**

#### **- La méthode d'explosion**

Cette méthode est basée en totalité sur les carrières, la puissance du stérile varie de 20 à 50 mètres, ce dernier découpé en gradins de 10 à 50 mètres, tandis que la couche du minéral, prise en une seule fois, a une puissance de 5 à 7 mètres (D.M.R, 1990).

#### **-L'abattage**

L'abattage des couches stériles se fait soit par mines verticales à partir du toit de la couche, soit à partir de la base de la couche par des mines horizontales, pour arracher un bloc de grès de 30 à 70 cm de puissance, l'abattage des couches supérieures à 1.5m est effectué à l'aide d'un engin de foration automoteur (D.M.R, 1990).

#### **- Méthode d'enrichissement**

L'enrichissement du minéral se faisait sur place par gravimétrie et par flottation, (Mouttaqi, 2011). A cause de l'importance des besoins en eau pour le traitement par flottation du minéral, l'usine de traitement construite en 1970 et 1971, fut bâties sur la rive droite de l'Oued Moulouya, non loin des premiers panneaux exploités, ayant une capacité de traitement de 1 400 000 tonnes/an de tout-venant.

A l'usine, le traitement du minéral commence par le concassage, ses produits d'alimentation ont une dimension inférieure à 1000mm et les produits concassés ont une dimension inférieure à 10mm, suivi du broyage qui permet d'obtenir une dimension inférieure à 290µm, dimension en dessous de laquelle les minéraux de plomb sont suffisamment libérés. Entre le concassage et le broyage s'intercale un silo de stockage de 9000 tonnes.

A l'entrée, le Pb se trouve à l'état de carbonate (cérusite), la flottation s'effectue dans un conditionneur et des cellules permettant le dégraissage, l'épaississement et le relevage (EL Hachimi, 2006).

Le traitement du concentré s'effectue par filtration, après épaississement (concentration en solide variant de 50 à 70%), il est pompé vers 2 filtres à disques, le résultat du traitement est sous forme de gâteaux titrant de 6 à 8% d'humidité.

Le rejet des résidus de traitement, cycloné puis épaissi pour la récupération des eaux, sont envoyés vers une digue de 50ha à 1500m à l'Est de l'usine, via deux conduites ayant 3 doubles stations de pompes.

### **VI.3. Diagnostic de l'état actuel des lieux dans la mine abandonnée Zeïda**

Suite à l'absence d'une loi exigeant l'aménagement du site après l'exploitation, ni de protection de l'environnement, le centre minier de Zeïda, comme plusieurs à travers le Maroc, vit une situation d'abandon totale, la dégradation du paysage est nettement visible sur terrain :

- D'immenses digues de résidus stériles de découverte dépassant les 20m de hauteurs (image 4-A), composées essentiellement d'argilites rouges, de marne et de grès, ces digues sont dépourvues de végétation, et ne sont exploitées que pour la production de brique ou autres matériaux de construction,
- Des installations de surfaces non aménagées, qui, à part la dégradation du paysage, présentent un risque réel pour la population,
- Des carrières non remblayées remplies de millions de litres d'eau (Photo.4). Ces eaux rougeâtres et minéralisées sont utilisées par la population voisine pour l'alimentation en eau potable souvent sans traitement physique ni chimique préalable, pour l'irrigation, l'abreuvement des troupeaux, et la baignade,
- Des digues de résidus de traitement ayant des teneurs élevées en métaux toxiques, de couleur jaunâtre (Photo.5), s'étendent sur 80ha et dépassant 15m de hauteur, elles se situent sur les rives de l'Oued Moulouya, ce dernier transporte ces résidus métalliquement pollués. Ces eaux sont par la suite utilisées pour l'agriculture ou pour l'alimentation en eau potable, ajouté à ceci, la détérioration du paysage par ces digues.



**Photo. 4 :** Résidus de décapage à proximité d'un lac de carrière



**Photo. 5 :** Résidus de traitement stockés dans des parcs à résidus

❖ **Descriptif des résidus de traitement et de décapage**

• **Les résidus de traitement**

les verses à stériles au nombre de trois, ils se situent sur un terrain plat et découvert, à 3 Km en aval de la laverie. La grande digue est située près de l’oued Moulouya sur sa rive gauche.

Selon El Hachimi (2006), l’étude granulométrique de ces résidus montre qu’ils présentent une texture très sableuse (Tableau.4) :

**Tableau. 4 :** Composition granulométrique des résidus miniers de traitement de Zeïda

- argile (%)	6,6
- limon fin (%)	5,4
- limon grossier (%)	0,4
- sable fin (%)	37,7
- sable grossier (%)	50

Les silicates sont les plus abondants dans ces résidus (Tableau.5), avec une dominance du Quartz, de minéraux argileux, et de calcite (Iavazzo et al., 2012).

**Tableau.5 :** minéralogie des résidus miniers de traitement de Zeïda (Wt % = weight percent)

Minéralogie	Formule du minéral	Résidus de Zeïda (wt. %)
<b>cérusite</b>	PbCO <sub>3</sub>	0,5
<b>Barite</b>	BaSO <sub>4</sub>	7,5
<b>Quartz</b>	SiO <sub>2</sub>	49,5
<b>K-Feldspars</b>	(K, Al, Si, O)	29,4
<b>Plagioclases</b>	(Na, Ca, Al, Si, O)	6,7
<b>Minéraux argileux</b>		4,1
<b>Fluorite</b>	CaF <sub>2</sub>	2,4

Ces résidus, et comme le montre les travaux d’El Hachimi (2006), sont très riches en ETM, et grâce à leur granulométrie assez fine, ils sont facilement érodés et transportés vers l’Oued Moulouya, et présentent par conséquent, la source de pollution la plus importante sur le trajet de l’Oued Moulouya (Tab .6).

**Tableau.6 :** Teneurs moyennes en ETM des résidus de traitement (ppm)

	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>	<b>As</b>
<b>Résidus de Zeïda</b>	1,3	118,7	5547	7500	192,2
<b>Teneurs moyennes dans la croûte terrestre</b>	0,15	62,5	16	101	5

• **Les résidus de décapage**

Ces résidus sont essentiellement composés de roche stériles des formations encaissantes du gisement, ces résidus sont assez loin du parcours de l’Oued Moulouya.

## **Chapitre III : Matériels et méthodes**

## I. Choix des stations d'échantillonnage

Pour l'évaluation du degré de contamination métallique des sédiments de surface par ces métaux, deux missions d'échantillonnages ont été effectuées. La première en période de pluie (mois de février), caractérisée par de faibles températures, et une deuxième en période sèche (mois de Juin) à fortes températures.

Le choix des 10 stations d'études (ZM1 à ZM6, ZB1, ZB2, ZAn1, ZAn2) fut de manière à ce qu'elles soient accessibles et reflètent les caractéristiques chimiques principales des sédiments, pour permettre un suivi spatio-temporelle des concentrations en ETM de la station de référence jusqu'au barrage Hassan II.

Dans chaque station, seule les sédiments de surface furent l'objet de prélèvement. En effet, cet horizon est très important, du fait qu'il est en contact direct et continu avec les eaux, et représente préférentiellement les dépôts récents.



**Figure.15** : Situation géographique des sites de prélèvements au niveau de l'Oued Moulouya

Le tableau 8 montre les différentes stations d'échantillonnage, les raisons du choix de chacune ainsi que les coordonnées géographiques correspondantes.

**Tableau.7** : Sites de prélèvements des sédiments

Stations		Raisons de choix de la station		Coordonnées Géographiques
Oued Moulouya	ZM1	correspond à la station de référence, elle se situe sur l’oued Moulouya à 30Km en amont de la mine de Zeïda, loin des apports domestiques anthropique du village et du centre minier.		N 32°41'12,00" W -5°13'05,9"
	ZM2	Plus proche du centre minier que la station ZM1, cette station a pour but de vérifier l’étendu de la pollution en amont de la mine, et de suivre les concentrations des ETM jusqu’à la laverie.		N 32°47'47,00" W -4°57'52,9"
	ZM3	cette station se situe sur la rive gauche de l’oued Moulouya, à proximité des digues à résidus miniers, et permet de détecter l’impact direct des résidus sur les sédiments avoisinants.		N 32°50'14,2" W -4°57'06,3"
	ZM4	Ces stations se situent en aval du centre minier, et permettent le suivie de la contamination jusqu’au barrage Hassan II, pour mieux comprendre le comportement des ETM le long de l’Oued Moulouya.		N 32°50'49,9" W -4°56'13,4"
	ZM5			N 32°51'31,2" W -4°55'20,00"
	ZM6			N 32°51'11,9" W -4°50'55,1"
Affluent : Ansegmir	ZAn1	En amont du point de rencontre avec l’Oued Moulouya	Ces stations ont pour but de déterminer si l’Oued Ansegmir contribue, ou non, à la contamination de l’Oued Moulouya par les ETM, et d’étudier en même temps, les différentes propriétés des sédiments de cet affluent	N 32°44'39,2" W -4°54'59,2"
	ZAn2	Plus proche du point de rencontre, en aval.		N 32°10'23,11" W -4°53'26,90"
Barrage Hassan II	ZB1	en amont du barrage	Le choix de ces stations est vital, la quantification des concentrations des ETM de ses sédiments permettra de déterminer si la contamination atteint même le barrage, ce dernier étant une source principale d’alimentation en eau potable et divers activités.	N 32°46'46,7" W -4°47'39,3"
	ZB2	En aval du barrage		N 32°47'53,6" W -4°46'05,8"

## II. Echantillonnage des sédiments

L’échantillonnage des sédiments s’est fait dans chaque station, à l’aide d’une bène en plastique pour éviter tout type de contamination, à environ 10 à 20 cm de l’interface eau/sédiments, l’échantillonnage a visé uniquement les sédiments de surface de 0 à 5 cm, sur les berges.

Les échantillons sont par la suite introduits dans des sachets en plastique, bien fermés, puis stockés dans une glacière jusqu’au laboratoire, ou ils sont mis dans un réfrigérateur à 4°C et conservés jusqu’à utilisation.

### **III. Préparation des échantillons de sédiments**

La préparation des échantillons est obligatoire avant d'entreprendre les analyses géochimiques, elle commence par le séchage des échantillons, cette opération se fait à l'aide d'une étuve à 105°C, et dure 24h, un mortier en porcelaine est utilisé pour moudre les sédiments secs.

Ensuite on procède au broyage des échantillons, vu que certaines analyses (ex : DRX, ICP) nécessitent un diamètre <0.2mm (pour la mise en solution des échantillons), cette opération est assurée par un broyeur de tungstène.

L'opération finale est le tamisage des échantillons, qui vise à séparer les particules supérieur à 0.2mm, de ceux qui y sont inférieur, les échantillons sont par suite séparés et mis dans des sachets en plastique en attendant l'analyse.

### **IV. Propriétés physico-chimiques des sédiments**

Les diverses analyses ont été réalisées dans différents laboratoires.

#### **IV.1. Caractérisation minéralogique par diffraction de rayons X (DRX)**

Les minéraux, de part leurs propriétés physico-chimiques, sont capables de réagir avec les ETM présents dans le milieu environnant. En fonction de la répartition des ETM au sein d'un sédiment, ils seront faiblement ou fortement adsorbés donc plus ou moins mobilisables en fonction des conditions chimiques du milieu.

L'étude de la minéralogie des différents échantillons de sédiments a été réalisée par diffraction des rayons X (DRX) aux laboratoires de l'URSTM à l'Université du Québec en Abitibi-Témiscaminque (Canada) à l'aide d'un diffractomètre type Bruker AXS Advance D8 équipé avec un détecteur de scintillations et Co Ka radiation. Les données sont collectées pour les angles de diffraction de 5° à 70° avec un pas de 0,005 et une durée d'acquisition de 0,5 s par pas.

A chaque phase cristalline correspond un ensemble caractéristique de pics de diffraction (diffractogramme). Cette signature unique permet donc une caractérisation et une identification de toutes les phases (CRMD, 2010)

#### **- Comment ça marche ?**

On prépare l'échantillon sous la forme d'une poudre aplanie dans une coupelle, ou bien sous la forme d'une plaquette solide plate. On envoie des rayons X sur cet échantillon, et un détecteur fait le tour de l'échantillon pour mesurer l'intensité des rayons X selon la direction. Pour des raisons pratiques, on fait tourner l'échantillon en même temps, ou éventuellement on fait tourner le tube produisant les rayons X.

#### **- Résultats et traitement**

Les résultats sont exprimés sous forme de spectres, les Pics de diffraction sont observables et peuvent correspondre à plusieurs minéraux mais aussi à un seul.

Pour le traitement des spectres obtenus, nous avons utilisé le programme X'Pert Highscore, qui est un programme graphique de dépouillement de diagrammes de diffraction X.

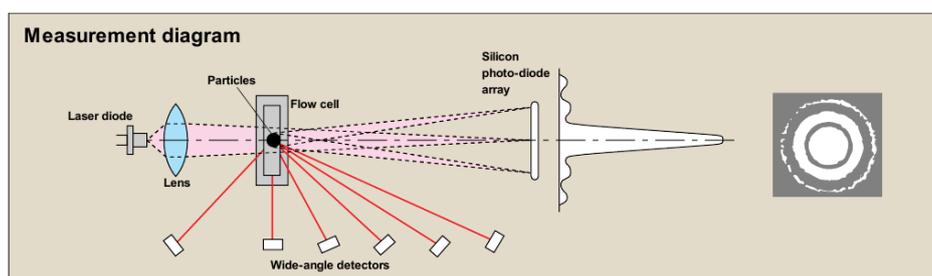
## IV.2. Granulométrie par diffraction laser

L'analyse granulométrique permet de caractériser la distribution de taille des particules d'un solide. Elle permet, également, d'identifier les différentes familles granulométriques (Sable, limon, argile) afin de les associer à une texture.

Certaines caractéristiques d'un sédiment qui peuvent avoir une influence sur la spéciation des polluants sont dépendantes de la taille des grains qui le compose (réactivité, surface spécifique...).

L'analyse granulométrique est effectuée au laboratoire Géoressources, FST-Gueliz, en utilisant l'appareil Horiba LA-300, ayant une gamme de détection de 0.1 à 600 $\mu$ m.

Le principe de l'analyse consiste à tamiser l'échantillon à 0.5mm, à mélanger 1g du sédiment avec de l'eau déminéralisée, et d'agiter la solution durant 24h sur des agitateurs magnétiques.



**Figure.16** Schéma illustrant la méthode de mesure au granulomètre laser

Les signaux électriques correspondant à l'intensité de la lumière diffusée sont utilisés pour calculer la taille et la distribution des particules.

Basé sur la théorie de diffusion de Mie, cette méthode de mesure donne toujours répétabilité supérieure avec une précision originale.

## IV.3. Mesure du pH

Le pH du sol a été mesuré au laboratoire des géoressources à la FST-Gueliz. Le pH du sol est mesuré dans un rapport sol/solution = 1/2,5. Les mesures sont faites avec de l'eau déminéralisée (Petard, J. 1993) à l'aide d'un pH mètre type JENWAY 3510.

### • Mode opératoire :

- Peser au trébuchet 20 g ( $\pm$  0.01 g) de sol tamisé à 2.0 mm, dans un bécher de 100 ml (Forme haute),
- Etalonner le pH-mètre à pH 7.0 puis vérifier le pH 4.0.
- Analyse :
  - Prendre le premier bécher, ajouter à l'aide d'un distributeur 50 ml d'eau déminéralisée et agiter la suspension sur un agitateur magnétique,
  - Préparer l'échantillon suivant 3 minutes après d'intervalle (respecter l'intervalle de 3 min entre chaque échantillon),
  - Plonger avec précaution les électrodes dans la suspension du premier échantillon.

Maintenir l'agitation et laisser l'aiguille du pH-mètre atteindre sa position d'équilibre avant d'effectuer la lecture. Faire la mesure au temps 9 minutes.

#### IV.4. Dosage de la matière organique

Le dosage de la M.O. a été effectué au laboratoire des géoressources à la FST-Gueliz. Afin de déterminer le pourcentage en matière organique dans chaque échantillon, le protocole suivant a été adopté (CEAEQ, MA. 1010 – PAF 1.0-modifié) :

- Dosage
  - Sécher l'échantillon de sédiment pendant une nuit (16 heures) à 150 °C,
  - Prendre le poids du creuset vide. Ajouter 10 g de sol séché (<2mm), noter le poids final,
  - Calciner le sol au four à moufle à 550°C pendant 16 heures,
  - Laisser refroidir dans un dessiccateur et peser l'aluminium contenant les cendres.
- Calcul et expression des résultats

Les résultats de l'échantillon sont calculés à partir de l'équation suivante :

$$\%M.O.= \frac{(P_0 - P_1) \times 100}{P_0}$$

M.O : matière organique

P<sub>0</sub> : le poids initial de l'échantillon après élimination de l'eau liée à 110°C.

P<sub>1</sub> : le poids de l'échantillon après incinération à 550°C.

#### IV.5. Détermination du pourcentage en carbone totale et soufre

La détermination du carbone total et du soufre total dans les échantillons solides a été faite par l'appareil CS-800 Double Range (Carbon/Sulfur Determinator) au laboratoire d'analyse LCME de la FST de Marrakech.



Photo. 6 : L'appareil Carbon/Sulfur Determinator

#### IV.6. Mesure de la conductivité électrique

La conductivité électrique mesurée à l'aide d'un conductimètre en us/cm exprime la capacité d'un sédiment mis en solution à se faire traverser par un courant électrique. La mesure a été réalisée au laboratoire des géoressources à la FST-Gueliz suivant la norme NF X 31-113 à l'aide d'un conductimètre type SensION+ Ec7 (HACH):

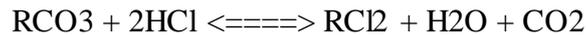
- 10 g de sédiment sec ont été pesés et mis dans un flacon, puis ajout de 50 ml d'eau distillée (rapport de 1/5), l'ensemble est mélangé à l'aide d'un agitateur mécanique pendant 20 min.
- Après 20 min d'agitation, la conductivité est mesurée à l'aide d'un conductimètre avec prise en considération la température du mélange.

#### IV.7. Analyse des carbonates

Le dosage des carbonates a été effectué au laboratoire des géoressources à la FST-Gueliz par un calcimètre.

Le calcimètre est un appareil destiné à la détermination de la teneur en carbonates  $\text{RCO}_3$  (R peut être du Ca, Mg, Sr, etc.) des sédiments. L'analyse est basée sur la mesure du volume de gaz carbonique dégagé par une quantité connue de sédiment avec de l'acide chlorhydrique (Rhoujjati, 2007).

Le gaz dégagé de la réaction exerce une pression sur le liquide contenue dans la burette graduée. Le liquide passe alors d'un volume initial  $V_1$  à un volume  $V_2$ . L'équation de la réaction produite à l'intérieur de la burette est la suivante :



- **Calcul des résultats**

Quand l'acide HCl est en excès, son action sur une mole de  $\text{CaCO}_3$  (100g/mol) libère une mole de  $\text{CO}_2$  (22,4 l soit 22400 mL).

Connaissant le volume de  $\text{CO}_2$  dégagé (niveau final - niveau initial), faire un produit en croix pour calculer la masse de  $\text{CaCO}_3$  attaqué.

Connaissant la masse de  $\text{CaCO}_3$  et la masse de l'échantillon, faire un produit en croix pour calculer le pourcentage de  $\text{CaCO}_3$  dans l'échantillon.

#### IV.8. Dosage des métaux

Les teneurs en ETM des différents échantillons (As, Cu, Pb, et Zn) ont été déterminées par un spectromètre d'émission atomique à plasma couplé inductif (ICP-AES) type Perkin Elmer Optima 3100 RL ICP AES après une digestion totale par  $\text{HNO}_3/\text{Br}_2/\text{HF}/\text{HCl}$ . Les analyses ont été réalisées au laboratoire de chimie des matériaux et de l'environnement à la faculté des sciences et techniques à Marrakech.

Le principe de l'ICP-AES réside dans l'atomisation et l'excitation des éléments contenus dans une solution à l'aide d'un plasma d'argon. Lorsqu'un élément excité retrouve son état fondamental, il y a libération d'énergie sous forme de radiations électromagnétiques à des longueurs d'ondes qui sont propres à l'élément. L'intensité de ces radiations est directement proportionnelle à la concentration de l'élément dans la solution analysée.

L'échantillon pénètre généralement dans le plasma sous une forme condensée (liquide ou solide), et doit donc subir les changements d'état suivants : fusion (pour les solides), vaporisation, ionisation. Les résultats de cette analyse sont exprimés en ppm (partie par million).

- **Avantages :**

- Dosage simultané de plusieurs éléments en même temps,
- Analyse rapide des éléments trace avec une grande précision et sensibilité,
- Large gamme de détection,
- Température élevée permet d'ioniser pratiquement tous les éléments.

- **Inconvénients**

- Coût élevé de l'analyse,
- L'effet mémoire fausse les résultats, généralement dû au mauvais entretien de l'appareil,
- Interférences suite à la présence d'éléments à masse isotopique égale.

## **Chapitre IV : Résultats et discussions**

## I. Introduction

Même après sa fermeture, un projet minier peut constituer une atteinte pour l'environnement avoisinant à long terme.

À Zeïda, les résultats des études précédentes ont révélé que les versées à rejets miniers abandonnées sans réhabilitation sont constituées de particules de taille fine, de stabilité géotechnique faible, très mobiles et présentent des teneurs élevées en éléments traces métalliques toxiques (ETM) (EL Hachimi *et al.*, 2013). Ces rejets à pH alcalin (8,4) subissent l'effet d'une intense érosion hydrique et en particulier éolienne et créent de multiples impacts environnementaux. En effet, en plus de l'impact paysager négatif qu'ils génèrent, les ETM contenus dans ces rejets sont transportés, disséminés et contaminent les ressources en eaux de surface et les sols aux alentours (EL Hachimi *et al.*, 2013). Ainsi, les résidus peuvent atteindre l'Oued Moulouya, voir même transportées jusqu'au barrage Hassan II situé en aval à 15 Km de la mine.

Dans notre étude il s'agit d'étudier la contamination des sédiments de l'oued Moulouya, de l'oued Ansegmir et de la retenue du barrage Hassan II située en aval de la mine abandonnée Zeïda. La détermination des teneurs en ETM dans les sédiments, la comparaison avec les valeurs des teneurs normales des ETM dans les sédiments et avec les teneurs en ETM des sédiments d'autres études permettent d'estimer une contamination éventuelle et déterminer son ampleur dans la zone étudiée.

Les risques d'accumulation des métaux dans les sédiments dépendent à la fois des conditions physicochimiques du milieu aquatique et de sa dynamique locale. Par conséquent, les distributions spatiales des ETM et de certains paramètres géochimiques (matière organique, sulfures, carbonates) permettront de renseigner sur la dynamique hydro-sédimentaire et sur la mobilité et le comportement des éléments métalliques.

En effet, dans les sédiments de surface, plusieurs réactions chimiques et biochimiques ont lieu et peuvent être à l'origine d'un flux de métaux labiles des sédiments vers la colonne d'eau. De plus la remise en suspension des sédiments fins riches en ces éléments peut affecter la composition de l'eau.

Le sédiment est un substrat éminemment variable par sa composition chimique, minéralogique, et granulométrique, chacun de ces trois composantes peut induire, par ses seuls changements, des variations des concentrations en métaux traces.

## **II. Caractérisation physique et physico-chimique des sédiments de l'oued Moulouya et de la retenue du barrage Hassan II**

### **II.1. Caractérisation physique des sédiments de surface**

#### **II.1.1. Caractérisation des composants majeurs de la minéralogie des sédiments par DRX**

Les teneurs en métaux des sédiments sont fortement dépendants directement et de façons différentes de la minéralogie de ces derniers, d'une part par la granulométrie des minéraux et d'autre part suite à leur composition chimique. En effet, certains minéraux sont intrinsèquement plus riches en métaux que d'autres, la composition chimique peut même conférer aux minéraux des capacités fixatrices particulières vis-à-vis des métaux.

L'analyse minéralogique a concerné 10 échantillons de sédiments prélevés au niveau de la Haute Moulouya dans l'oued Moulouya (ZM1, ZM2, ZM3, ZM4, ZM5, ZM6), dans l'oued Ansegmir (ZAn1, ZAn2) et dans la retenue du barrage Hassan II (ZB1, ZB2).

La minéralogie des sédiments est dépendante de la composition minéralogique des roches des principales unités géologiques de la région étudiée, la minéralisation au niveau de la mine de Zeïda et des résidus miniers abandonnés.

L'annexe I, représente la carte de variation spatiale des minéraux les plus abondants au sein des sédiments analysés, tandis que l'annexe (II) regroupe les minéralisations déterminées par les analyses de toutes les stations, tandis que

- Minéralogie des sédiments de l'Oued Moulouya

La minéralogie des sédiments de l'Oued Moulouya est en accord avec les descriptions minéralogiques de la région (cf. Bibliographie).

De l'amont vers l'aval, les sédiments des différentes stations montrent à peu près la même composition minéralogique, avec une abondance de quartz, calcite, d'illite et de gibbsite (Tableau8).

Les carbonates sont principalement représentés par la calcite et par la dolomite. Ces dernières sont de deux origines possibles : 1) l'érosion des sols et les formations limitrophes du bassin versant 2) d'origine chimique, par précipitation directe à partir des eaux chargées en  $\text{CO}_3^{2-}$  et en  $\text{Ca}^{2+}$ .

Les minéraux du granite sont présents dans la plupart des échantillons de sédiments étudiés par la présence de quartz, mais aussi de la biotite et de la muscovite (ZM2, ZM3), ceci est confirmé par la présence de chlorite (ZM1, ZM5) qui résulte généralement de l'altération de la biotite.

L'illite, ainsi que la gibbsite, sont très abondantes dans toutes les stations, sauf dans les stations ZM3 et ZM6 qui montrent une absence de l'illite. Ces minéraux correspondent aux principaux minéraux argileux observés.

Le gypse présent particulièrement dans les stations (ZM4, ZM6), est principalement d'origine lithologique.

Cependant, on observe différents minéraux riches en arsenic (ex : Allactite, Sinnerite, Bearsite et phaunouxite).

**Tableau. 8 :** Minéraux dominants dans les sédiments de surface de l’oued Moulouya

<b>ZM1</b>	Quartz, Illite, Calcite, Chlorite, Gibbsite, Dolomite, Allactite.
<b>ZM2</b>	Quartz, Calcite, Illite, Gibbsite, Biotite, Muscovite, Sinnerite
<b>ZM3</b>	Quartz, Gibbsite, Muscovite, Bearsite
<b>ZM4</b>	Calcite, Illite, Gibbsite, Gypse, Muscovite, Phaunouxite
<b>ZM5</b>	Quartz, Illite, Gibbsite, Chlorite, Barite
<b>ZM6</b>	Quartz, Calcite, Gibbsite, Gypse, fluoride d’arsenic

- Minéralogie des sédiments de l’affluent Ansegmir

La minéralogie des sédiments au niveau de cet affluent est assez similaire à celle observée dans les sédiments de l’Oued Moulouya, avec l’abondance de quartz, de calcite, d’illite et de gibbsite (Tableau9).

Ceci confirme d’avantage l’influence majeure de la lithologie sur la composition minéralogique des sédiments de surface.

Une nouvelle forme d’arsenic apparait en quantité importante, le potassium d’arsenic dans la station ZAn2.

**Tableau. 9 :** Minéraux dominants dans les sédiments de surface des affluents

<b>ZAn1</b>	Quartz, Calcite, Illite, Gypse, Bearsite.
<b>ZAn2</b>	Quartz, Illite, Gibbsite, Muscovite, potassium d’arsenic

- Minéralogie des sédiments du Barrage Hassan II

La minéralogie des sédiments au niveau du barrage HassanII reflète clairement l’apport de l’Oued Moulouya et de son affluent Oued Ansegmir. En effet, les minéraux des sédiments du barrage sont les mêmes que ceux rencontrés dans les sédiments des Oueds Moulouya et Ansegmir avec l’albite comme variété de feldspath plagioclase sodique provenant des granites (Tableau10).

On constate la présence du sulfure d’arsenic (réalgar :  $FeAsS$ ), souvent associé aux argiles et aux limons (Smedley et Kinniburgh, 2002), et du potassium d’arsenic ( $K_3As_{11}$ ) probablement drainés par l’Oued Ansegmir ainsi que par l’Oued Moulouya vers le barrage.

L’absence de la calcite au niveau des sédiments de la station ZB1 reflète l’importance des apports à partir des terrains géologiques avoisinants de cette zone amont du barrage.

Les minéraux argileux ainsi que le quartz dominant dans les sédiments de cette station.

**Tableau. 10 :** Minéraux dominants dans les sédiments de surface du barrage Hassan II

<b>ZB1</b>	Quartz, Gypse, Illite, Gibbsite, Albite
<b>ZB2</b>	Quartz, Calcite, Illite, Gibbsite, Albite, Muscovite, potassium d’arsenic, réalgar.

- ❖ Les minéraux liés à l’activité minière, tel que la galène, la blende, la cérusite et la pyrite, sont présents en faible quantité. Cependant, et vu qu’ils sont instables en conditions aérobies (Smedley et Kinniburgh, 2002), ils présentent tout de même un risque de contamination. La blende, par exemple, est très riche en zinc, tandis que la galène, peut contenir jusqu’à 75% de Pb.

Des oxydes de Pb sont aussi présent tel que la vanadinite et l’anglésite, mais à des quantités faibles : 1% pour la vanadinite et 3% pour l’anglésite (Annexe II).

## II.1.2. Caractérisation Granulométrique des sédiments

Les différentes fractions granulométriques d'un sédiment sont regroupées comme suit (Tessier, 2012) :

- proportion des argiles (<4  $\mu\text{m}$ ),
- limons fins (4-20  $\mu\text{m}$ )
- limons grossiers (20-63  $\mu\text{m}$ )
- sables fins (63-200  $\mu\text{m}$ )
- sables grossiers (200- 500 $\mu\text{m}$ )

La granulométrie est le facteur naturel le plus important susceptible de faire varier les concentrations en métaux traces d'un sédiment, en effet, les métaux présentent une grande affinité pour les sédiments fins, pour une simple raison physique : à masse égale, la surface disponible pour adsorber des métaux est plus importante pour des particules fine que pour des particules grossières (Chiffolleau et *al.*, 2004).

De nombreux auteurs ont montré les relations existantes entre la teneur en élément métallique et la granulométrie du sédiment, les teneurs les plus élevées se rencontrent en général dans la fraction la plus fine des sédiments (Baier et Healy, 1977).

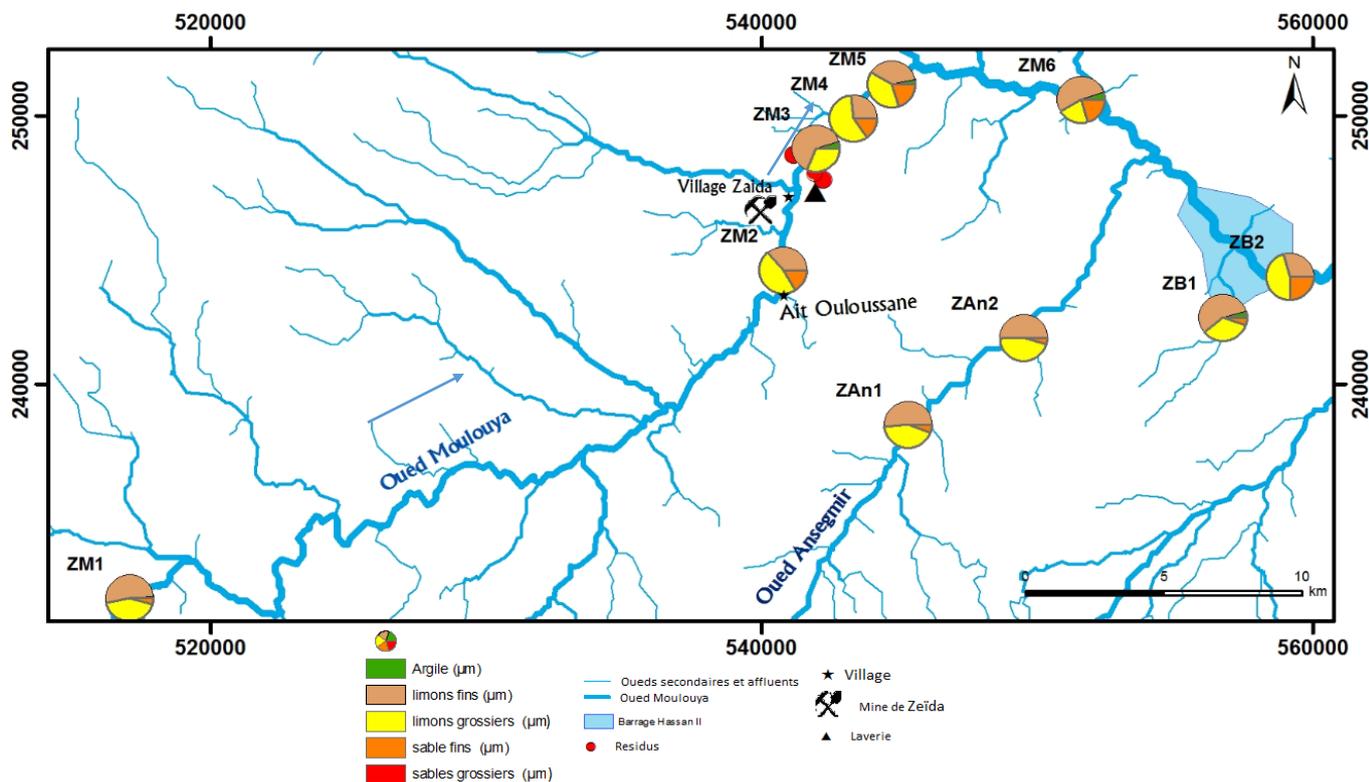
Les figures 17/18 ci-dessous donnent résultats des analyses granulométriques

### • Période pluvieuse

Les résultats de l'analyse granulométrique effectuée sur les 10 échantillons de sédiments prélevés montrent une dominance de la fraction fine (<63  $\mu\text{m}$ ), Le pourcentage en particule fine (argile – limons) varie entre 75,017 et 99 %, le pourcentage en sable fins (63-200  $\mu\text{m}$ ) varie de 0.8% à 25%, la fraction > 200  $\mu\text{m}$  est très peu présente, et varie de 0 à 0.6% (figure 17).

Les argiles sont peu abondants, les concentrations maximales sont observées aux stations ZM6, ZM3, et ZB1, avec respectivement 4.8%, 4.6% et 4% d'argiles. La texture limoneuse domine, vu que les limons (fins et grossiers) représentent la partition majeure, avec des concentrations allant de 73,139 à 94,558 %.

Le long de l'Oued Moulouya, la station ZM3 est la plus propice à l'accumulation des métaux durant la période pluvieuse, vu qu'elle contient les pourcentages les plus élevés en particules fines, cette station se situe à proximité des versées des rejets miniers de traitement, ce qui amplifie d'avantage les risques de contaminations, en effet, les études d'El Hachimi et *al.*, (2013), montrent que ces résidus de traitement, sont de granulométrie fine, et sont par suite facilement transportés.

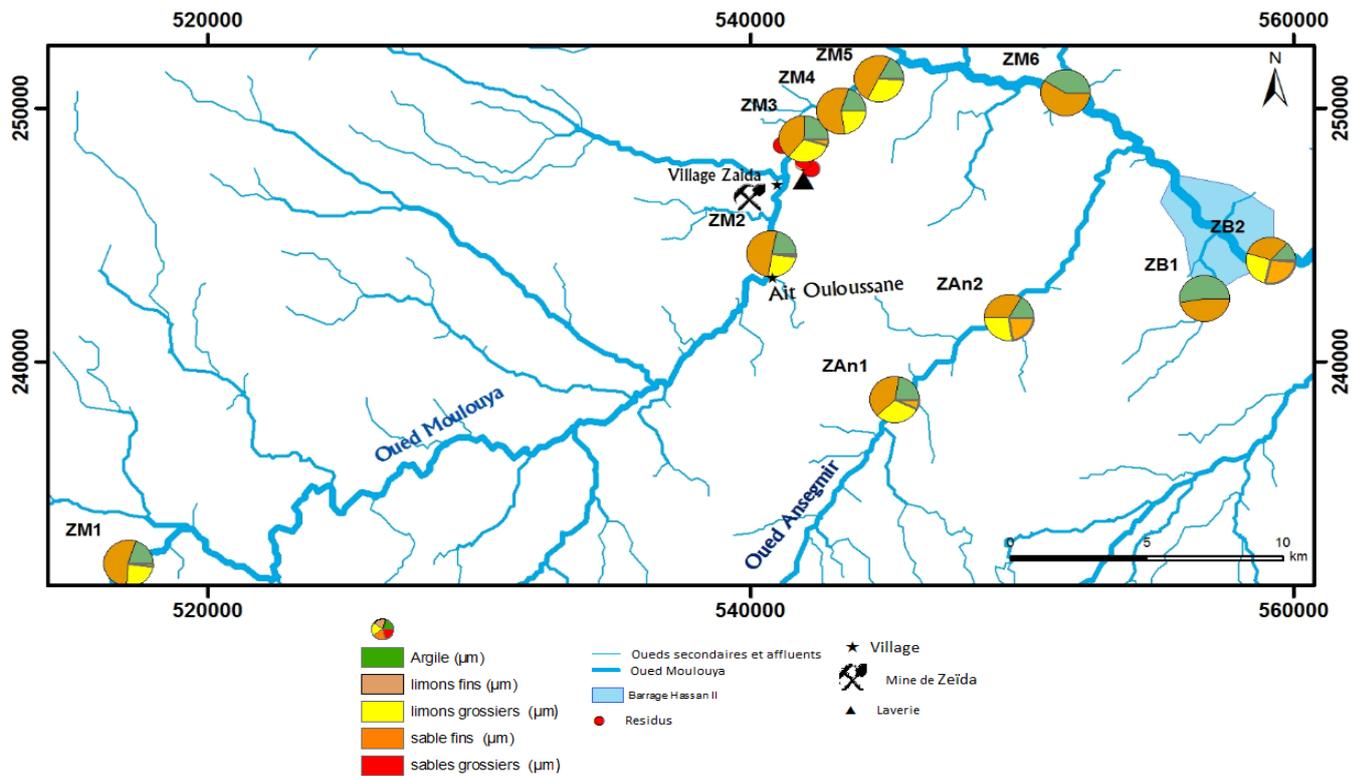


**Figure. 17 :** Répartition des fractions granulométriques (%) durant la période pluvieuse

- **Période sèche**

La dominance des particules fines est d'autant plus importante que durant la saison sèche, la fraction  $<63\mu\text{m}$  atteint 100% dans les stations ZM6 et ZB1, avec une augmentation des teneurs en argile, ces teneurs varient entre 13 et 52%, les limons sont aussi très abondants, avec des teneurs variant de 47 à 81% tandis que les teneurs en sables fins ont diminuées par rapport à ceux de la saison pluvieuse, et varient de 0 à 27%. Les sables grossiers quant à eux, sont très peu abondants (Figure 18).

L'augmentation des quantités de particules fines est due, à la dynamique des Oueds. En effet, durant la saison pluvieuse, le débit a tendance à augmenter (figure11- Chap. II), ceci entraine l'arrachement de particule plus grossière, ce qui explique l'abondance des sables au niveau des sédiments superficiels, tandis que durant la saison sèche, le débit est extrêmement faible, et seules les particules fines sont transportées vers l'aval.



**Figure. 18 :** Répartition des fractions granulométrique (%) durant la période sèche

Ces résultats montrent l'importance de la part fine dans les sédiments de surface, que ça soit le long de l'Oued Moulouya, du barrage HassanII, ou de l'Oued Ansegmir. Ces zones sont alors très vulnérable à la contamination par les éléments traces, en effet, plus un sédiment est fins, plus sa capacité d'adsorption est forte (Taylor et Boulton, 2007 ; Ujevic et al., 2000).

## II.2. Etude physico-chimique

### II.2.1. Matière organique et carbonates :

#### - Répartition de la matière organique :

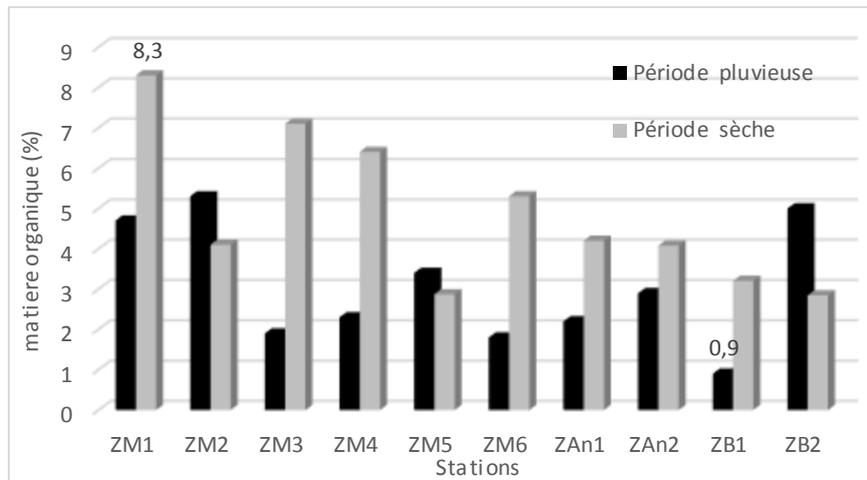
La figure 20 donne la distribution des teneurs en matière organique (M.O.) dans les sédiments superficiels prélevés dans la zone d'étude. Les teneurs enregistrées en période sèche sont beaucoup plus importante que celles correspondantes à la période pluvieuse sauf pour ZB2, ZM2 et ZM5.

La teneur maximale observée caractérise la station ZM1 (8,3%) en période sèche, et la station ZM2 (5,3%) en période humide. La teneur minimale enregistrée est 0,9% durant la période pluvieuse (ZB1) et 2,8% durant la période sèche (ZB2).

Les teneurs élevées en M.O. en saison sèche dans les sédiments s'expliquent par le fait que cette saison est favorable au développement de phytoplancton dans les fleuves (Cauwet 1985, Ludwig 1997) et donc à la productivité maximale de la matière organique.

La quantité de M.O. est moins importante à la station amont ZB1, qu'à la station aval ZB2, ceci peut être expliqué par l'importance des conditions réductrices à la station ZB1. En plus, les vents ouest forts remarqués à la station ZB2 jouent aussi un rôle majeur dans l'apport en éléments nutritif, d'où la présence plus importante de la matière organique à la station

ZB2, en aval du barrage, la station ZB1 étant protégée des vents. Cependant, les teneurs en M.O. restent généralement faibles, ceci peut être expliqué par le fait que les prélèvements ont été réalisés en surface des sédiments, la M.O. subit par conséquent, une oxydation importante, causant sa dégradation et la libération des ETM associés à celle-ci.



**Figure. 19 :** Variation spatio-temporelle de la matière organique

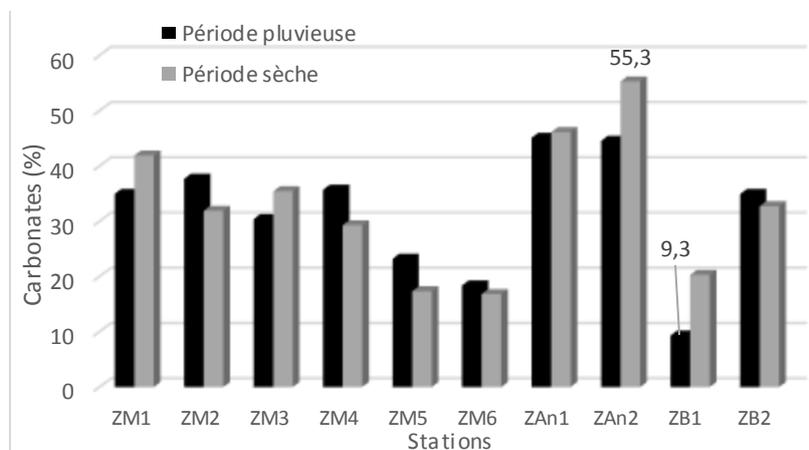
#### - Répartition des carbonates

L'analyse de la variation des teneurs en carbonates dans les sédiments superficiels de la zone étudiée montre, d'une part, que ces teneurs varient entre 9,3% (ZB1) et 45,1% (ZAn1) durant la période humide, et entre 16,8% (ZM6) et 55,3% (ZAn2) durant la période sèche.

La variation spatio-temporelle (figure 20) ne suit aucune lois précise, ces teneurs enlevées sont essentiellement liées à l'origine détritique. En effet, les eaux de l'Oued Moulouya et de ses affluents, en amont, traversent diverses formations calcaires.

D'autre part, l'origine de la calcite peut aussi être liée à la précipitation directe de la calcite à partir des eaux, essentiellement due à leurs alcalinités élevées.

Les carbonates, caractérisés par leur propriété d'adsorption des ETM, peuvent contribuer à l'augmentation des teneurs de ces derniers dans les sédiments. Les teneurs assez élevées en carbonates remarquées dans la majorité des sédiments prélevés dans les différentes stations amplifient le risque d'accumulation des ETM dans les sédiments.



**Figure. 20 :** Variation spatio-temporelle des teneurs en carbonates

## II.2.2.pH :

La variation du pH est le facteur dont l'action sur la mobilité des métaux est la plus déterminante. La spéciation du métal change avec le pH et influence la fixation sur la phase solide.

Les pH mesurés durant la période pluvieuse sont généralement, plus élevés que ceux de la saison sèche (figure 21).

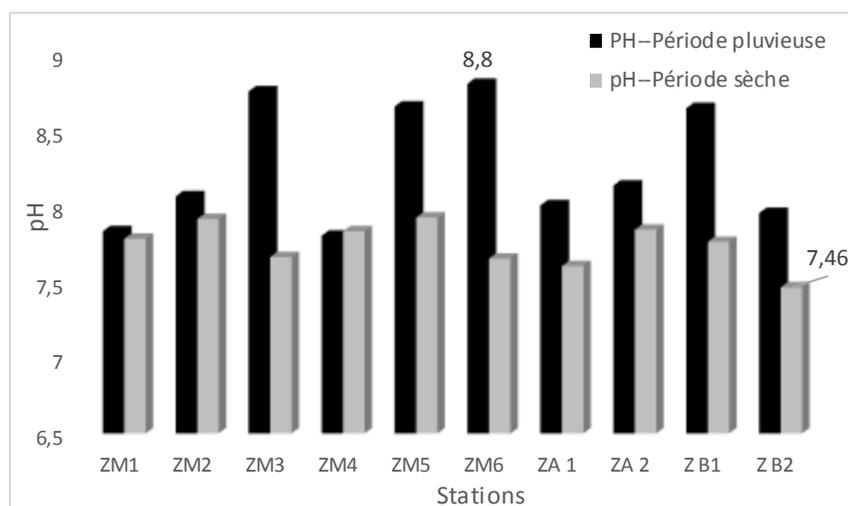


Figure. 21 : Variation spatio-temporelle du pH

Les pH mesurés, sont alcalin dans leur majorité, avec une valeur minimale de 7,8 à la station ZM4, et une valeur maximale de 8.8 à la station ZM6 durant la période pluvieuse. Durant la saison sèche, les valeurs diminuent, mais sans dépasser une unité de pH pour la majorité des stations, sauf dans ZM3 et ZM6.

La légère diminution du pH est essentiellement due d'une part à l'évaporation des eaux engendrant un enrichissement en éléments dissous, d'autre part à la dissociation de la molécule de l'eau libérant des ions d'hydrogène dans le milieu, ce qui engendre une acidification du milieu.

Selon Bonnet (2000), le pH est fortement lié au système tampon développé par les carbonates et les bicarbonates, en effet, les sédiments étudiés sont riches en carbonates, ces carbonates provenant essentiellement de l'érosion du fond géochimique constitué de formations marno-dolomitique et calcaire riche en carbonates, ainsi que de la précipitation des carbonates, surtout la calcite. Ceci favorise d'avantage la contamination des sédiments. En effet, selon Gharbi (2008), l'augmentation du pH contribue à la diminution du potentiel de surface, en diminuant la concurrence des protons par rapport aux ions métalliques ce qui favorise ainsi leur fixation, la précipitation pouvant également se produire à pH élevé.

Les ETM peuvent être mobilisés en cas de modification des conditions environnementales, surtout du pH, selon Quantin (2001), quand le pH diminue, des processus de désorption ou de dissolution auront tendance à entraîner le relargage des cations métalliques depuis le sédiment vers la phase dissoute, tandis qu'un pH alcalin, dominant dans l'Oued Moulouya, favorise la précipitation des métaux et de leurs complexes.

### II.2.3. Conductivité

Les résultats de mesures de la conductivité sont illustrés dans la figure 22. Les conductivités mesurées sont plus élevées durant la saison sèche. L'évaporation de l'eau donne un enrichissement en ions, ceci augmente d'avantage la minéralisation des sédiments, contrairement à la période pluvieuse, où la dilution par les eaux engendre leur lessivage.

Les conductivités les plus élevées sont rencontrées en aval de la mine de Zeïda, avec une valeur maximale de 374  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à la station ZM5 durant la saison sèche, 315  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à la station ZM3 en période pluvieuse.

Au barrage Hassan II, la station ZB1, en amont, présente une conductivité de 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , qui correspond à la plus faible conductivité observée, mais atteint 337  $\mu\text{S}/\text{cm}$  durant la saison sèche, tandis qu'en aval, la station ZB2 présente une conductivité moyenne.

La variation importante au niveau de la station ZB1 peut être dû à un apport important en fragment de roches, peu minéralisées durant la période pluvieuse, pouvant provenir des affluents situés sur les lits du barrage, tandis que durant la saison sèche, l'augmentation de la conductivité est due aux apports de sédiments fortement minéralisés provenant des Oued Moulouya et Ansegnir.

Les deux stations sur l'Oued Ansegnir montrent des conductivités relativement faibles.

Les rejets miniers abandonnés au voisinage des ressources en eaux peuvent aussi contribuer à l'augmentation de la minéralisation des sédiments. En effet, ces rejets sont fortement minéralisés, l'érosion et le transport des particules fines de ces résidus vers les oueds peut donner lieu à une augmentation de la conductivité au niveau des sédiments.

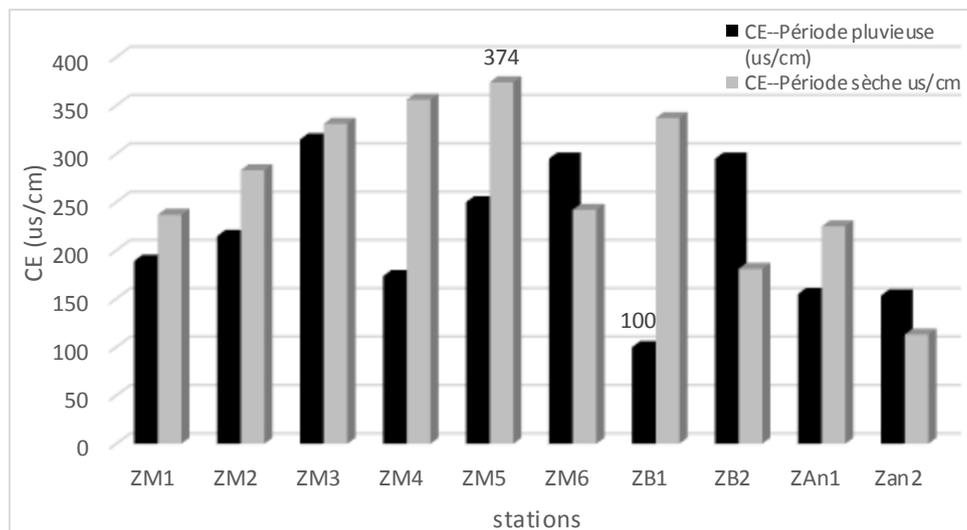


Figure. 22 : Variation spatio-temporelle de la conductivité

## II.2.4. Soufre total :

Les résultats concernant la période pluvieuse sont illustrés par la figure 23. Les teneurs en soufre sont faibles, variant de 0.03% jusqu'à 0.45%. Les sédiments des stations en aval de la mine présentent des teneurs faibles.

Les sédiments de la station ZM6 présente la valeur maximale, les apports en sédiments à partir de cette station vers le barrage Hassan II sont remarqués dans les sédiments à la station ZB1 montrant une teneur assez proche en soufre.

Les sédiments de l'Oued Ansegmir quant pour leur part, montrent des teneurs extrêmement faibles en soufre.

Le soufre provient essentiellement du gypse, ainsi que des sulfures rependus dans la majorité des stations (galène, blende, bearsite..), (Annexe II).

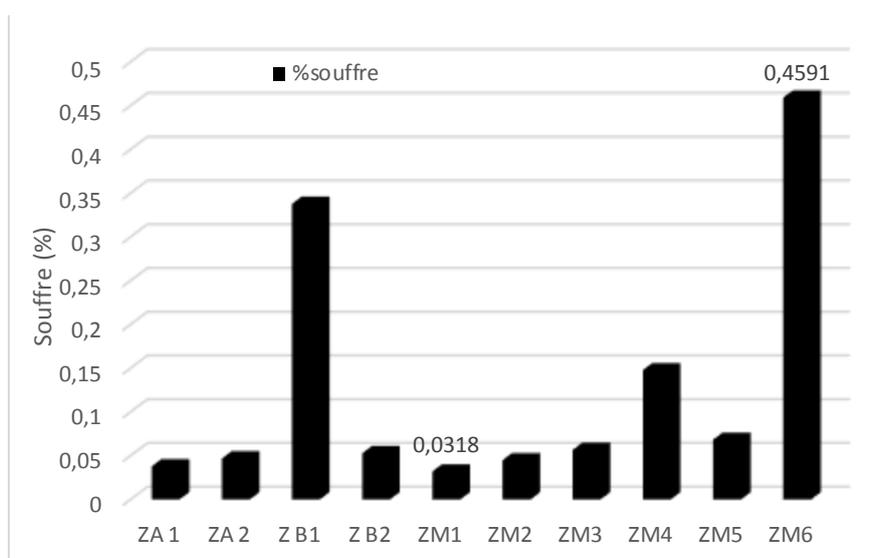


Figure. 23 : Variation spatiale des teneurs en soufre total

## III. Eléments traces métalliques (ETM)

### III.1. Teneurs en métaux des sédiments de l'oued Moulouya, l'Oued Ansegmir et de la retenue du barrage Hassan II

Les résultats d'analyse des ETM dans les sédiments de l'Oued Moulouya (figures 24, 25, 26, 27) montrent une variabilité importante de la station ZM1 en amont, jusqu'au barrage situé en aval de la mine Zeïda.

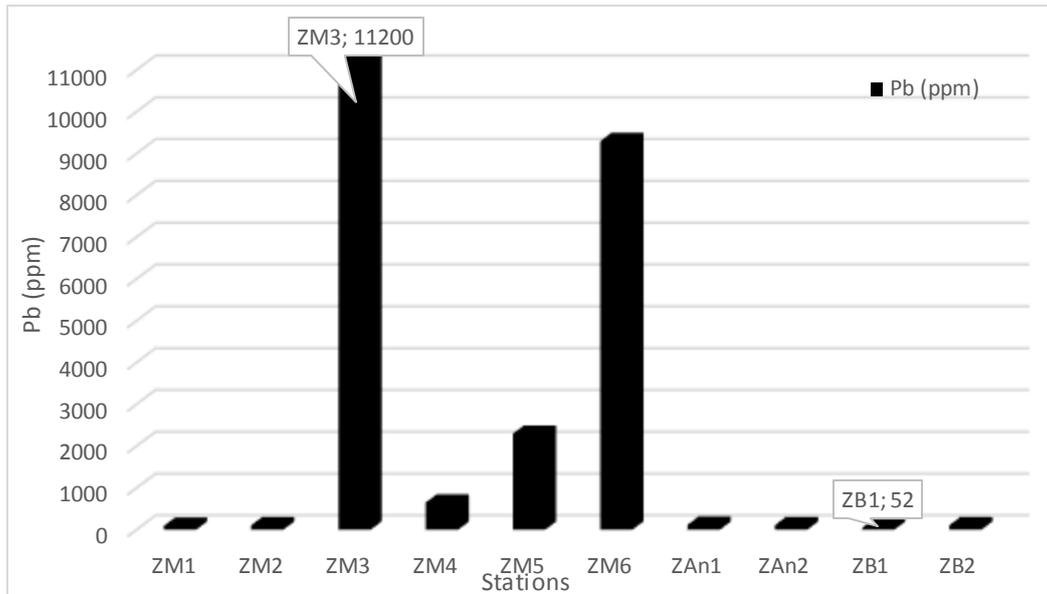
- **Le Plomb**

La figure 24 donne les variations des teneurs en Pb des sédiments dans les stations étudiées. La teneur maximale en Pb dans les sédiments est enregistrée à la station ZM3, et atteint 11 200 ppm, cette teneur très élevée, est en effet 115 fois supérieure à celle enregistrée dans les sédiments de la station de référence ZM1 dont la teneur en Pb est de (97 ppm).

Les teneurs en Pb dans les sédiments de toutes les stations sur oued Moulouya sont supérieures à celles enregistrées à la station de référence ZM1.

Les sédiments de la station ZB1 sont caractérisés par une teneur en Pb pratiquement 1/2 fois plus faible que celle de ZM1 (52 ppm), tandis que la station ZB2 titre 110 ppm. Il ressort que les sédiments du barrage ne montrent pas un enrichissement important en plomb malgré les apports supposés à partir de la mine Zeïda située en amont.

Les teneurs en Pb enregistrées dans les sédiments des deux stations d'Ansegnir sont peu élevées par rapport à celles de la station de référence (ZM1), avec une valeur maximal de 120 ppm à la station ZAn1, et une minimale (110 ppm) à la station ZAn2.

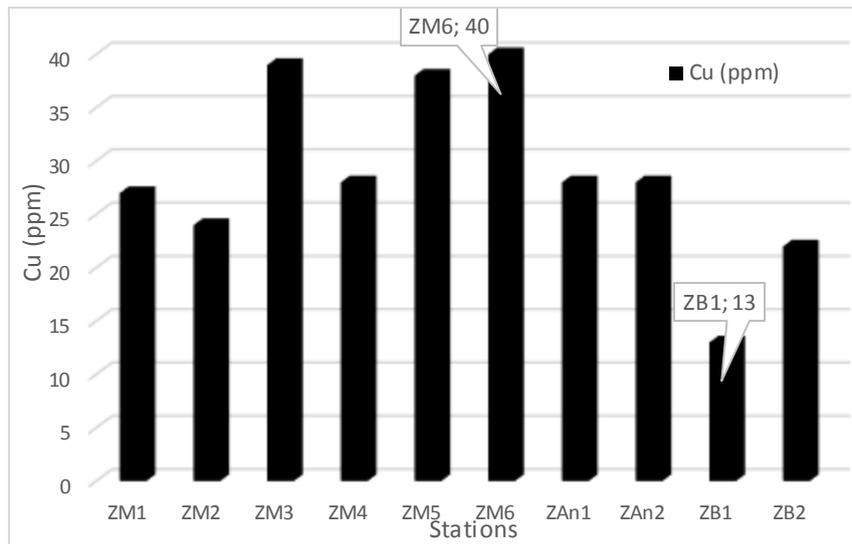


**Figure. 24 :** Variations des teneurs en Pb dans les sédiments des stations étudiées

- **Le Cuivre**

La figure 25 donne les variations des teneurs en Cu des sédiments dans les stations étudiées. Les teneurs en cuivre des sédiments de l'Oued Moulouya varient entre 24 ppm enregistrée à la station ZM2 et 40 ppm enregistrée à la station ZM6. Les teneurs des sédiments dans les stations situées en aval de la mine de Zeïda sont très élevées.

Les sédiments du barrage montrent des teneurs en Cu nettement inférieures, ZB1 (13 ppm), et ZB2 (22 ppm). Les sédiments des stations ZAn1 et ZAn2 sur l'oued Ansegnir montrent des teneurs assez proches respectivement 28 ppm et 27 ppm. Les apports de Cu vers le barrage sont réalisés mais elles restent moins importantes.



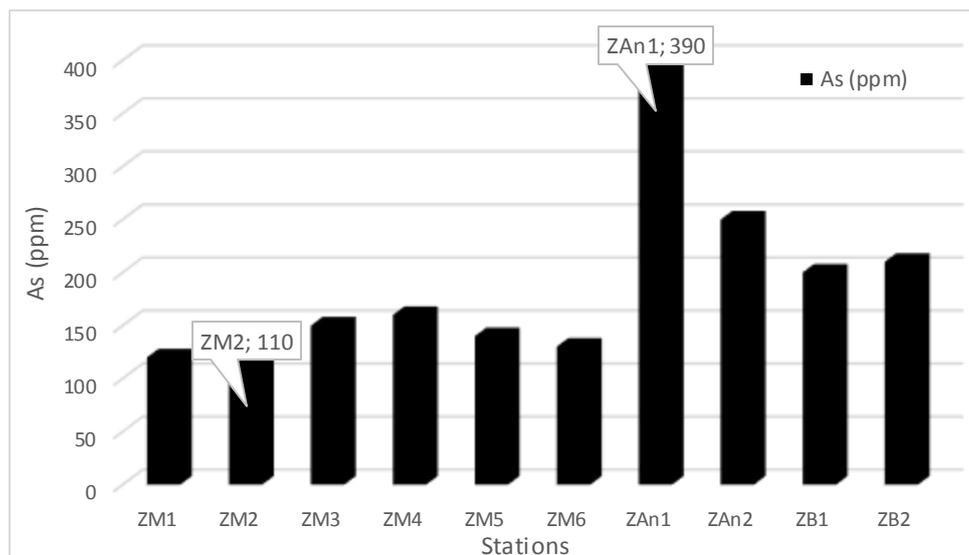
**Figure 25 :** Variations des teneurs en Cu dans les sédiments étudiés.

- **L'Arsenic**

La figure 26 donne les variations des teneurs en As les sédiments des stations étudiées. Les teneurs en arsenic pour les sédiments de l'oued Moulouya sont supérieures à ceux enregistrés dans les sédiments de la station de référence ZM1 (120ppm). La teneur en arsenic atteint sa teneur maximale au niveau des sédiments de la station ZM4 (160 ppm), la valeur minimale est enregistrée dans les sédiments de la station ZM2 (110 ppm).

Les sédiments du barrage montrent de leur côté des teneurs élevées soit 200 ppm pour les sédiments de ZB1 et 210 ppm pour les sédiments de ZB2, ces teneurs sont supérieures à ceux enregistrés dans les sédiments de la station ZM1 choisie comme station de référence.

Les teneurs enregistrées dans les sédiments des stations sur oued Ansegmir sont très élevées en particulier pour les sédiments de ZM1 qui montrent une teneur 3 fois élevée que celle enregistrée dans les sédiments prélevés dans ZM1 soit 390 ppm.

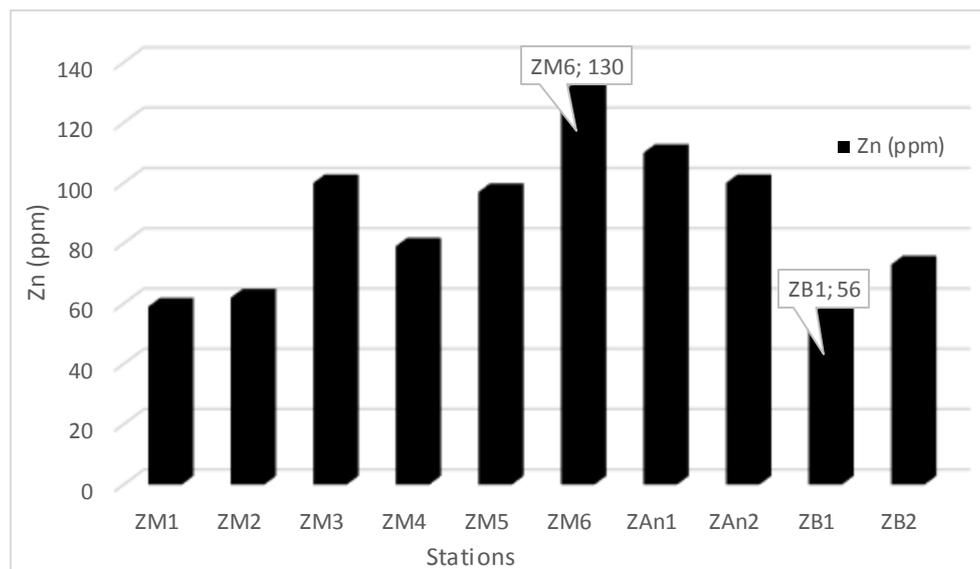


**Figure. 26 :** Variation spatiale des teneurs en As dans les sédiments de l'oued Moulouya superficiels

## • Le Zinc

La figure 27 donne les variations des teneurs en Zn des sédiments dans les stations étudiées. Les teneurs en Zn dans les sédiments sont très élevées pour la plus part des stations que ce soit sur les oueds ou sur le barrage Hassan II, elles sont supérieures à celles enregistrées dans les sédiments de la station de référence ZM1 (59 ppm). La valeur maximale 130 ppm est enregistrée dans les sédiments de la station ZM6.

Les teneurs enregistrées dans les sédiments du barrage sont faiblement élevées. Les teneurs sont élevées pour les sédiments des stations situées au niveau et en aval de la mine Zeïda. L'influence de la mine est certaine. Les sédiments de l'Oued Ansegnir présentent des teneurs assez proche, mais tout de même, supérieures à la teneur enregistrée à la station de référence ZM1.



**Figure. 27 :** Variation spatiale des teneurs en Zn dans les sédiments étudiés.

## ❖ Conclusion

Les teneurs en métaux dans les sédiments, durant la période pluvieuse, mettent en relief une contamination des sédiments de l'Oued Moulouya, de son affluent Oued Ansegnir et du barrage Hassan II. Les teneurs en métaux des sédiments sont élevées au voisinage de lamine et vers l'aval. Les teneurs en ETM dans les sédiments du barrage Hassan II sont moyennement élevées pour As et Zn et faiblement élevées pour Pb et Cu comparées à ceux enregistrées dans la station de référence ZM1.

Le transfert des ETM de la mine vers le barrage est certains. Le comportement de ces ETM devrait être étudié.

## **III.2. Discussion de l'impact de la mine abandonnée Zeïda sur les teneurs en métaux des sédiments**

La cartographie des teneurs en ETM permettra de mettre en évidence les différentes sources de contamination éventuelles, l'analyse de l'impact de la mine portera sur la zone d'étude entière, afin de mieux comprendre l'apport des différentes composantes du milieu en ETM, mais principalement, la mine de Zeïda.

### **III.2.1. Cartographie et discussion des teneurs en ETM**

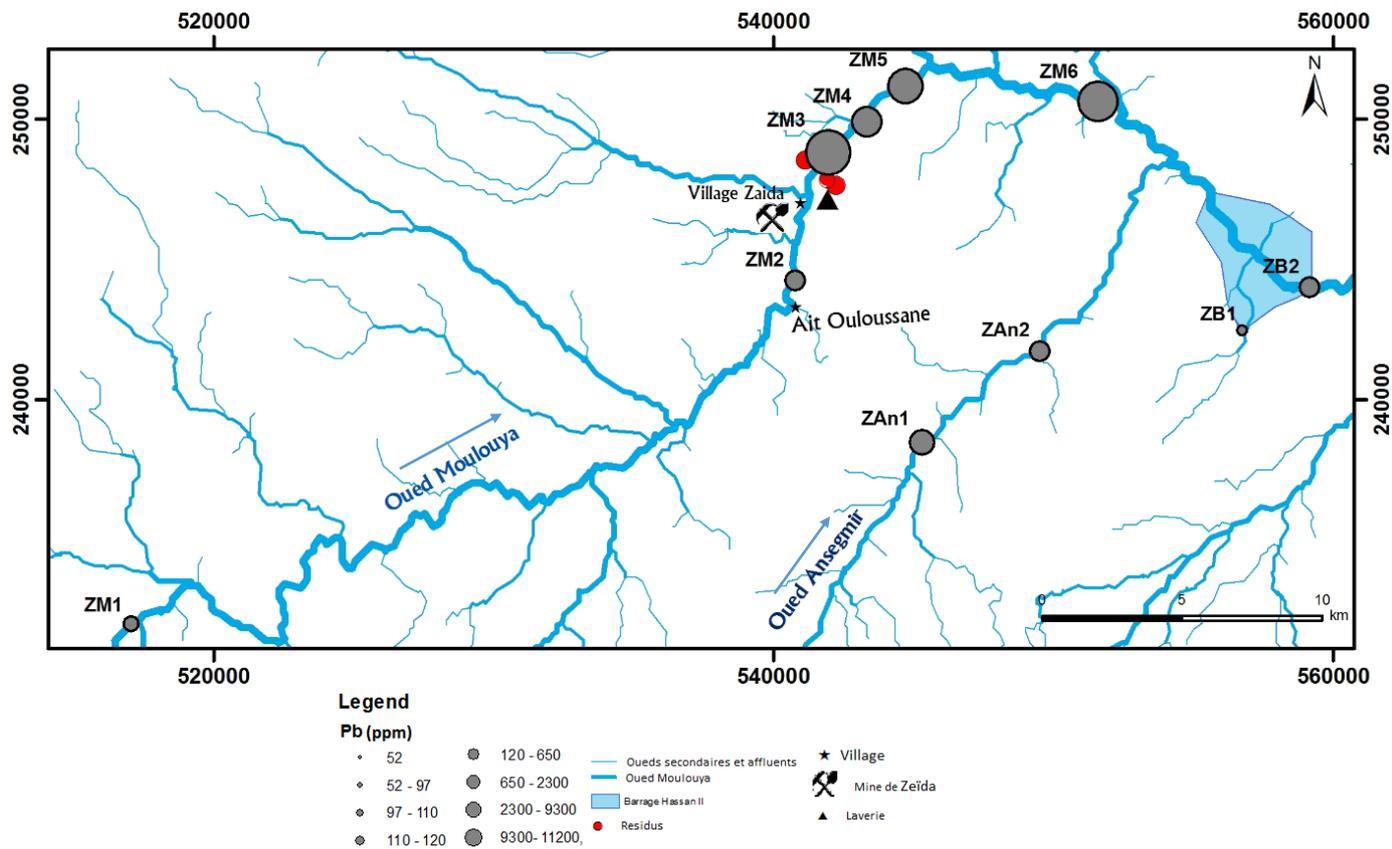
- **Le Plomb**

Comme le montre la figure 28, la zone la plus contaminée par Pb se situe entre la mine de Zeïda et le barrage Hassan II, et comprend les stations ZM3, ZM4, ZM5 et ZM6, cette contamination très intense en Pb et dont la teneur maximale atteint 11 200 ppm à la station ZM3 soit une valeur 115 fois plus élevée que celle observée en amont de la mine à la station de référence ZM1 (97 ppm).

La distribution du plomb montre clairement l'évolution des teneurs en aval de la mine, cependant, on remarque une diminution des teneurs au niveau du barrage, on parle alors d'atténuation des teneurs des métaux. En effet, les travaux de d'Axtmann et Luoma (1991) ont montrés que les teneurs en ETM diminuent progressivement en aval de la source principale des métaux.

Les sédiments de la station ZB2 plus riche en Pb, du fait que les vents dominants, à direction Ouest, engendrent un transport plus important des sédiments vers cette station causant ainsi une accumulation plus importante en sédiment, contrairement à la station ZB1 en amont, qui est assez isolée et reçoit un apport limitée en sédiments.

Les travaux d'El Hachimi et *al.*(2013), montrent que la teneur moyenne en Pb des résidus de traitement est de 5547 ppm, même si cette teneur est excessivement élevée, reste inférieur à celle observée à la station ZM3 (11200 ppm), ceci confirme d'avantage, que les sédiments constituent, un milieu exceptionnel d'emmagasinement et de concentration du plomb, surtout que cette station, présente une granulométrie fine, et se situe à proximité des résidus.



**Figure. 28 :** Variation spatiale du plomb

### • L'arsenic

L'arsenic bien qu'il soit présent à des teneurs assez élevées dans les sédiments en aval de la mine de Zeïda (figure 29), surtout à la station ZM4, atteint des valeurs maximales aux stations ZAn1 et ZAn2, ainsi qu'au barrage Hassan II (> 200 ppm).

L'évolution spatiale de l'arsenic dans les sédiments montre un enrichissement dans les stations en aval de la mine, comparé aux stations en amont (ZM1, ZM2). Ces teneurs subissent une atténuation (ZM4>ZM5>ZM6) en aval de la mine.

Les teneurs des sédiments des stations ZM3, ZM4, ZM5, ZM6 sont respectivement 150ppm, 160ppm, 140ppm et 130 ppm. Ces teneurs sont inférieures à celle des résidus de traitement abandonnés au niveau de la mine Zeïda mesurée par El Hachimi et *al.*, (2013), qui est de l'ordre de 192,2 ppm.

La contamination au niveau du barrage par l'arsenic, n'est pas uniquement due aux résidus miniers, mais peut être due aussi, aux apports en sédiments de l'oued Ansegmir. En effet, les sédiments de ce dernier sont très riches en arsenic, avec des teneurs > 250 ppm.

Ces fortes teneurs peuvent être dues aux activités agricoles répandues à proximité des berges de l'oued. Les engrais riches en arsenic peuvent atteindre l'oued suite à l'érosion des sols agricoles, du lessivage et du ruissellement. L'arsenic est alors transporté vers le barrage.

Les teneurs assez élevées aux stations ZM1 et ZM2 (120, 110 ppm), peuvent être dues soit à l'activité agricole, ou à l'altération des formations lithologiques (Smedley et Kinniburgh,

2002), et essentiellement celle des Schistes et des Granites. Ces formations sont répodues dans la Haute Moulouya, et peuvent expliquer une partie de l'apport en arsenic.

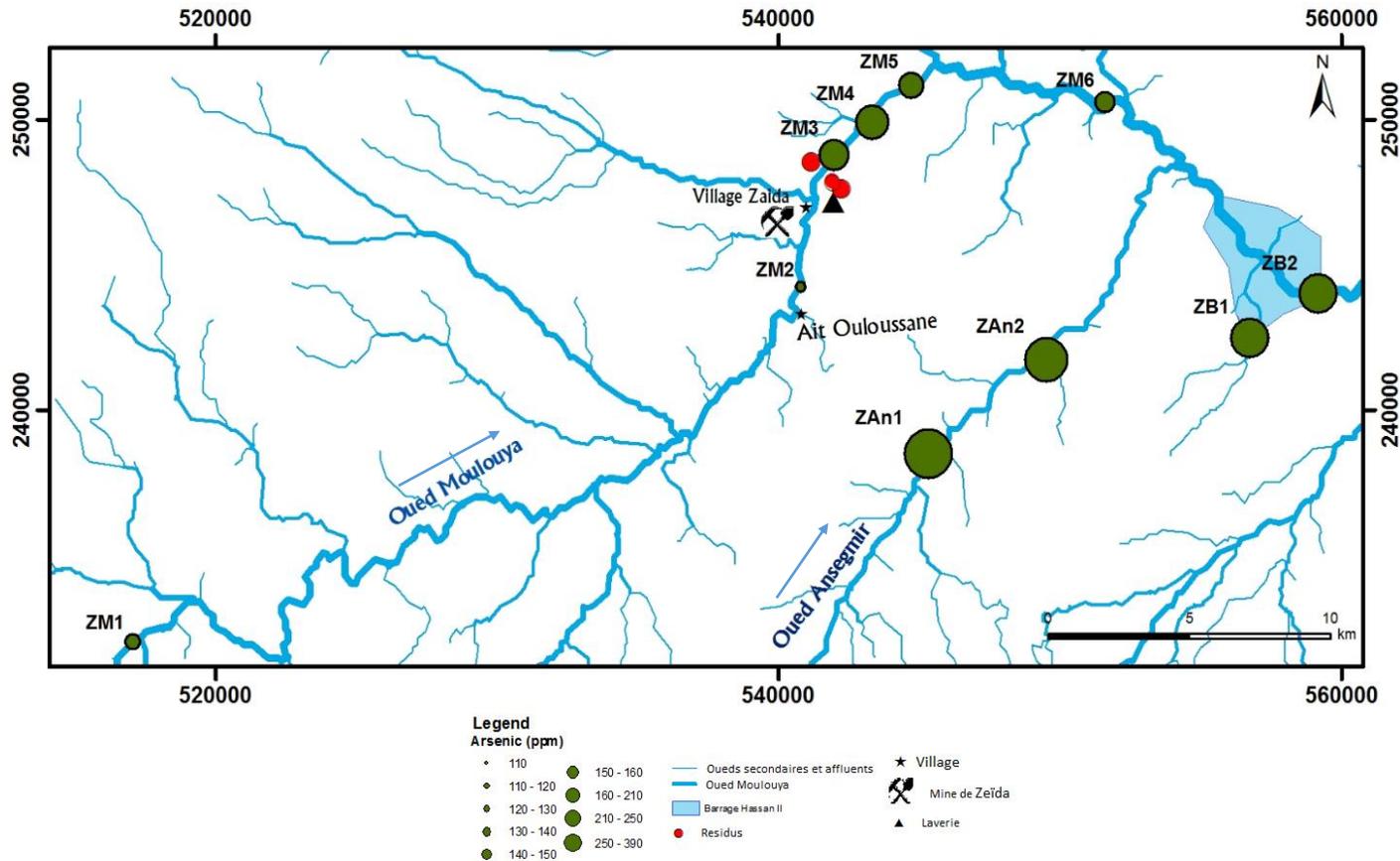


Figure. 29 : Variation spatiale de l'arsenic

### • Le cuivre

Les sédiments des stations en aval de la mine présentent des teneurs plus élevées que les sédiments des stations amont (figure 30), avec une teneur maximale de 40 ppm à la station ZM6, une teneur 1,5 plus élevée que celle enregistrée à la station de référence ZM1 (27 ppm).

Les teneurs en cuivre enregistrées dans les sédiments, même en aval de la mine et des résidus miniers, restent faible comparées aux teneurs enregistrées par El Hachimi (2013) dans les résidus (118 ppm). Ces teneurs faibles peuvent être expliqués par la compétition entre les différents métaux, comme le montre les travaux de Serpaud *et al.* (1994), l'adsorption du cuivre est très inférieure à celle du plomb, ceci explique les faibles teneurs en cuivre dans les sédiments en aval de la mine.

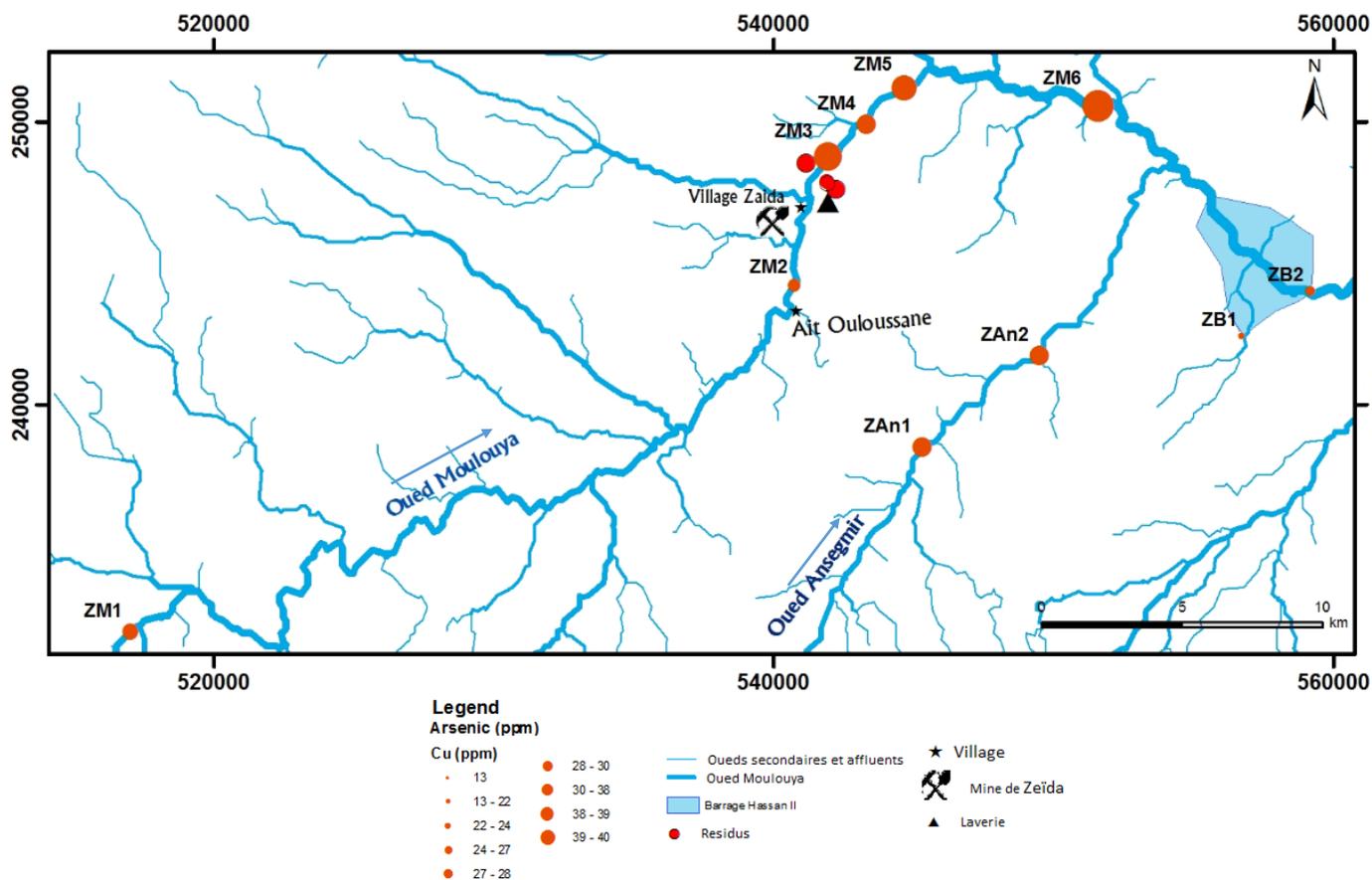


Figure. 30 : Variation spatiale du cuivre

• **Le zinc**

Le zinc se concentre essentiellement en aval de la mine (figure 31), particulièrement dans les sédiments de la station ZM6, ceci peut être lié essentiellement à l'érosion des résidus miniers. Les stations ZM1 et ZM2 présentent des teneurs plus faibles.

Ces teneurs en zinc dans les sédiments restent cependant très inférieures à celle mesurée par El Hachimi et *al.*, (2013) pour les résidus de traitement (7500 ppm), ceci peut être due à la concurrence avec le plomb, ce dernier étant le métal le plus lourd et le plus préférentiellement adsorbé (Serpaud et *al.*, 1994).

L'adsorption du zinc est favorisée par la dominance de la fraction fine (Baize, 1997), surtout dans les sédiments schisteux et argileux.

Les sédiments de l'Oued Ansegnir éloigné de la mine de Zeïda présentent aussi des teneurs élevées en Zn. Le zinc des sédiments dans ce cas proviennent alors, en plus des rejets miniers, des terrains géologiques et des phases minérales assez abondantes dans la région d'étude, représentées par la smithsonite et la sphalérite (AnnexeII).

Les teneurs en zinc au barrage Hassan II sont cependant faibles, ceci est dû à l'atténuation des métaux.

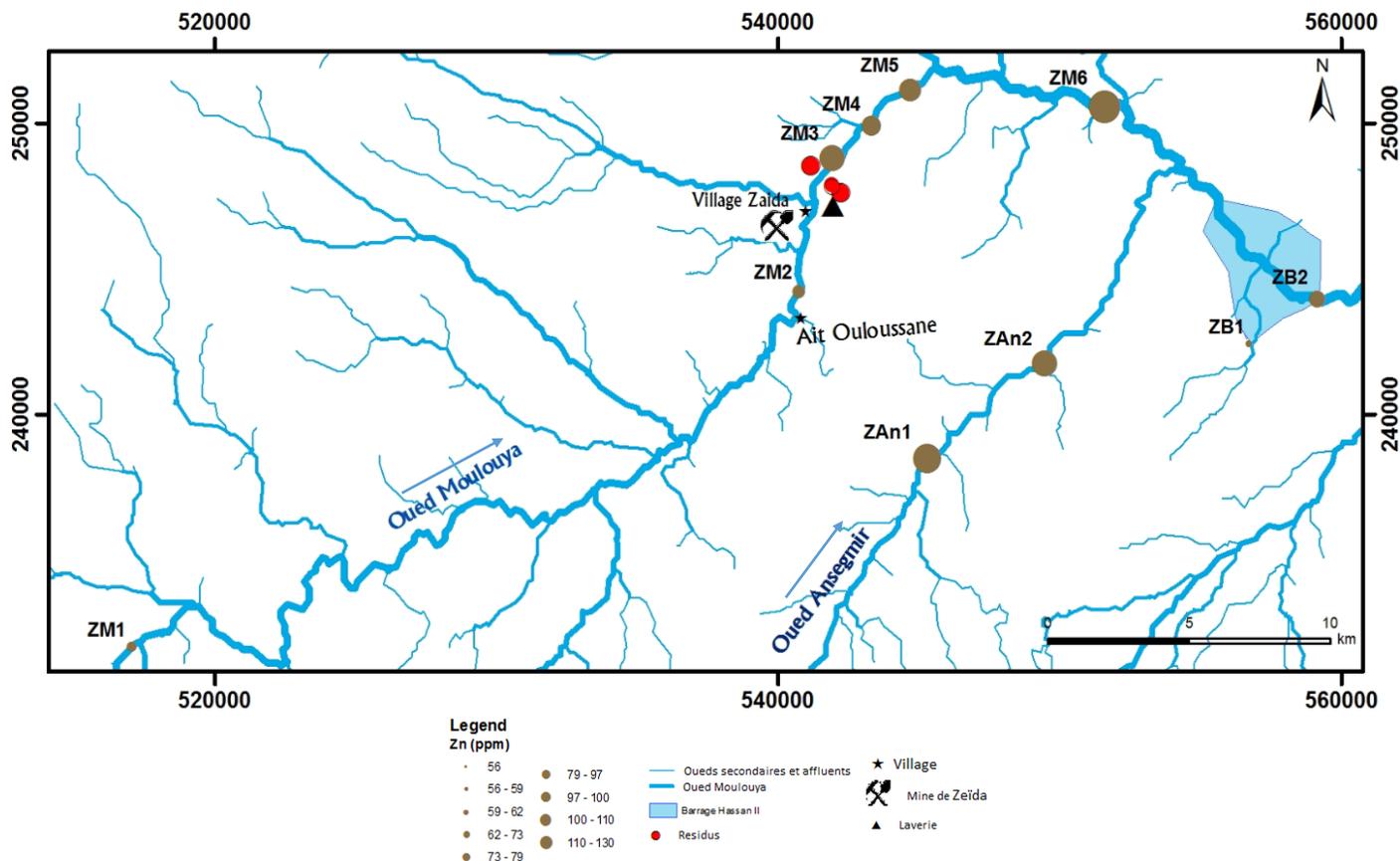


Figure. 31 : Variation spatiale du zinc

La contamination des sédiments peut être attribuée essentiellement à l'érosion des résidus de traitement abandonnés sans réhabilitation, situées à quelques mètres des berges de l'Oued Moulouya. En effet, ces résidus instables et de granulométrie fine et non végétalisés, sont vulnérables à l'érosion, que ça soit éolienne ou hydrique, les particules ainsi érodées sont transportées, atteignent les ressources en eau et sont déposées sous forme de sédiments, ou transportées plus en aval. Serpaud *et al.* (1994) ont classé les métaux suivant leur potentiel d'adsorption :  $Pb > Zn > Cd > Cu$ . Un classement contraire peut être alors établi pour la mobilité :  $Cu > Cd > Zn > Pb$ . Le Pb étant le moins mobile possédant le potentiel élevé d'adsorption et donc dont le pouvoir de transfert est faible. L'inverse est vrai pour le Cu.

### III.2.2. Indice de contamination

Selon Belamie et Pheliphot (1982), l'évaluation du degré de contamination du sédiment se fait par comparaison avec les teneurs de la station de référence, en calculant l'indice de contamination :

$$I_c = \text{Teneur mesurée du métal} / \text{Teneur de référence}$$

Dans la présente étude, la station ZM1 a été retenue comme site de référence compte tenu de sa localisation loin de toute perturbation d'origine anthropique et de ses faibles teneurs en

métaux comparées à celles mesurées au niveau des autres stations, l'indice de contamination peut être soit:

- $I_c > 1$  : un  $I_c > 1$  indique un début de contamination, son augmentation est accompagnée par une amplification d'intensité de la contamination.
- $I_c$  proche de 1 : station peu ou pas contaminée.
- $I_c < 1$  : lié essentiellement à une erreur analytique, de prise d'échantillon, ou indiquant l'effet d'une dilution importante.

L'indice de contamination moyen ( $I_{cm}$ ) permettra par la suite, de comparer et de caractériser les stations entre elles vis-à-vis de la pollution globale, afin d'établir un classement selon l'ampleur de la contamination dans l'ensemble de la zone d'étude :

$$I_{cm} = \sum I_c/n \text{ (n correspond au nombre d'indice pour chaque station).}$$

**Tableau. 11 :** Variations spatiales des indices de contamination (IC)

Stations	Ic Cu	Ic As	Ic Pb	Ic Zn	$\sum I_{cm}$
ZM1	1	1	1	1	1
ZM2	0,89	0,92	<b>1,13</b>	<b>1,05</b>	1,00
ZM3	<b>1,44</b>	<b>1,25</b>	<b>115,46</b>	<b>1,69</b>	29,96
ZM4	<b>1,04</b>	<b>1,33</b>	<b>6,70</b>	<b>1,34</b>	2,60
ZM5	<b>1,41</b>	<b>1,17</b>	<b>23,71</b>	<b>1,64</b>	6,98
ZM6	<b>1,48</b>	<b>1,08</b>	<b>95,88</b>	<b>2,20</b>	25,16
ZAn1	<b>1,04</b>	<b>3,25</b>	<b>1,24</b>	<b>1,86</b>	1,85
ZAn2	<b>1,04</b>	<b>2,08</b>	<b>1,13</b>	<b>1,69</b>	1,49
Z B1	0,48	<b>1,67</b>	0,54	0,95	0,91
Z B2	0,81	<b>1,75</b>	<b>1,13</b>	<b>1,24</b>	1,23

Les résultats du calcul de l'indice de contamination (tableau 11) montrent que toutes les stations présentent des indices de contamination supérieur à 1 pour tous les ETM, sauf pour Cu et As dans les stations ZB1 et ZM2. La ZM2 est située en amont de la mine de Zeïda alors que ZB1 est protégée et ne reçoit suffisamment d'apport sédimentaire.

Les résultats du calcul de l'indice de contamination montrent aussi une contamination polymétallique accentuée pour le plomb dans les stations ZM3, ZM4, ZM5, ZM6.

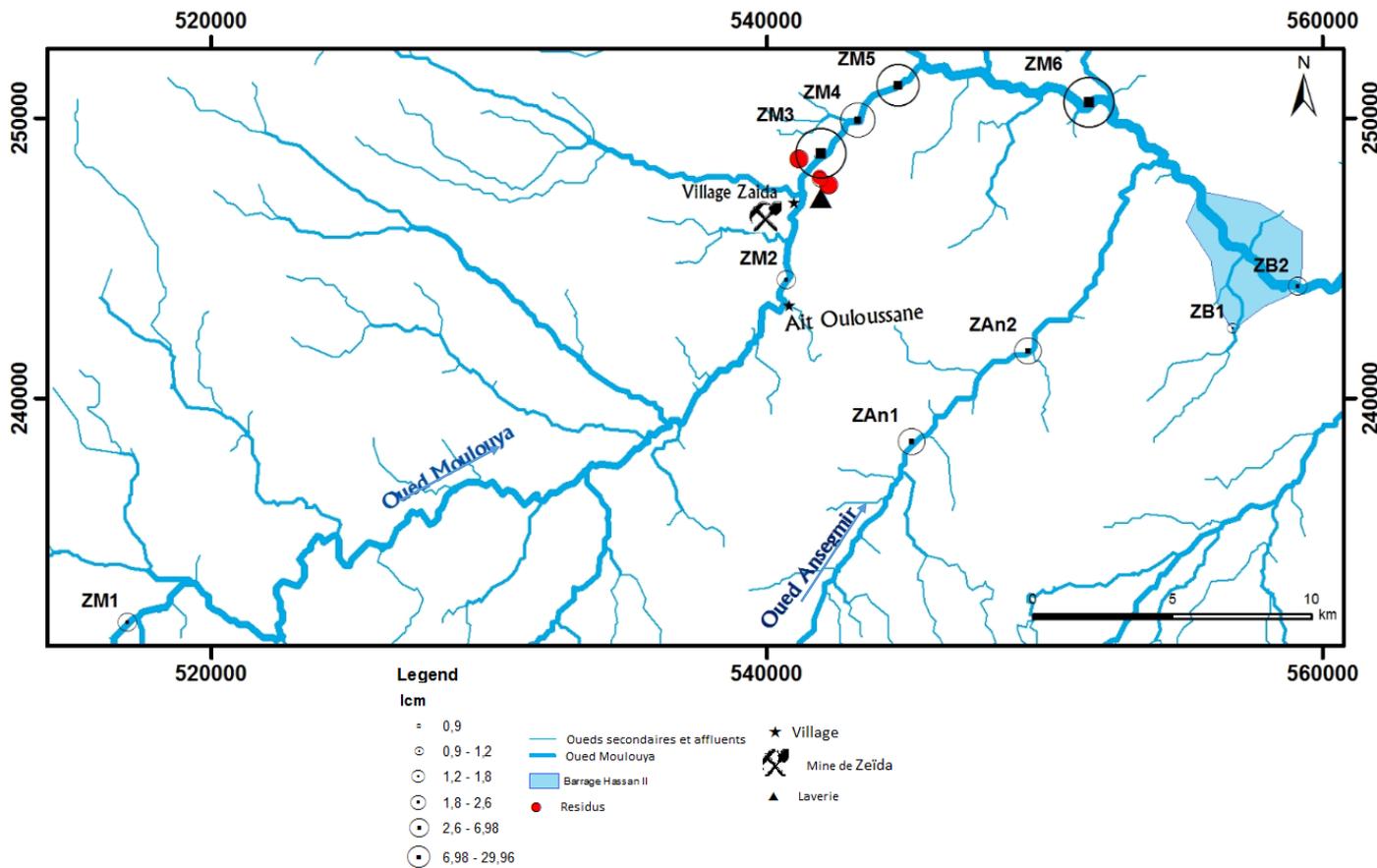
Ces stations se situent toutes, en aval de la mine et des résidus miniers, ceci reflète l'impact des rejets miniers sur la composition des sédiments, surtout que ces résidus, sont très riches en ETM.

Les stations de l'Oued Ansegmir et du barrage Hassan II, présentent une contamination en arsenic, plus importante que celle en plomb, comme le montre les indices de contaminations enregistrés (tableau 11).

La comparaison de la classification des stations selon leur indice de contamination moyen permet de donner l'ordre de contamination décroissant suivant (figure 32) :

$$ZM3 > ZM6 > ZM5 > ZM4 > ZAn1 > ZAn2 > ZB2 > ZM1 > ZM2 > ZB1$$

Ceci confirme d'avantage l'impact négatif de la mine de Zeïda et des résidus de traitement abandonnés sur les sédiments avoisinant, et ceux plus en aval.



**Figure. 32 :** Cartographie des indices de contaminations moyens

### III.2.3. Synthèse à partir d'un traitement statistique (A.C.P.)

Le type d'analyse utilisé "**Analyse par composantes principales**", permet de déterminer un système d'axes de référence hiérarchisés tel qu'en diminuant le nombre de dimensions de l'espace dans lequel on projette les points-observations, la perte d'information soit minimale (Daget, 1976).

L'application d'une A.C.P. aux mesures de descripteurs se caractérise par l'utilisation des résultats bruts sans découpage en classes préalables (Azzaoui, 1999), c'est une méthode de réduction du nombre des caractères permettant des représentations géométriques des variables (teneurs et substrats) et des observations (prélèvements).

L'analyse a permis de retenir deux axes principaux puisqu'ils représentent 64,8 % de la variance totale (figure 34).

- **Présentation des données**

La matrice donnée correspond à un tableau comportant 11 lignes et 11 colonnes (tableau 12), Il représente les teneurs en métaux totaux : Pb, Cu, Zn, As, et 5 substrats (CaCO<sub>3</sub>, granulométrie, pH, CE, Matière organique) caractérisant la période pluvieuse.

**Tableau. 12 :** Teneurs en métaux totaux et substrats

Stations	Carbonates%	fraction < 63 (um)	fraction > 63 (um)	Matière organique%	Cu (ppm)	As (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	CE $\mu$ S/cm	PH
ZM1	34,94	94,985	4,737	4,7	27	120	97	59	189,3	7,83
ZM2	37,7	83,371	16,63	5,3	24	110	110	62	215	8,06
ZM3	30,39	99,161	0,838	1,9	39	150	11200	100	315	8,75
ZM4	35,71	84,492	15,509	2,3	28	160	650	79	173,5	7,8
ZM5	23,2	79,017	20,377	3,4	38	140	2300	97	250	8,65
ZM6	18,39	78,001	20,907	1,8	40	130	9300	130	295	8,8
ZAn1	45,11	93,893	6,107	2,2	28	390	120	110	155	8
ZAn2	44,57	94,702	5,106	2,9	28	250	110	100	153,5	8,13
ZB1	9,3	93,908	5,185	0,9	13	200	52	56	100	8,64
ZB2	34,95	75,017	24,981	5	22	210	110	73	295	7,95

• **Relations entre les métaux**

Selon Waris et *al.*, (2010), le coefficient de corrélation détermine la relation entre deux variables et mesure l'intensité de ce lien. Il varie entre -1 et +1. Lorsqu'il est égal à 1, il indique un lien parfait entre les variables et lorsqu'il est égal à 0, il indique une absence de lien. Le signe + signifie que la relation est proportionnelle alors que le signe - signifie que la relation est inversement proportionnelle.

Le calcul du coefficient de corrélation permet d'avoir une idée sur les éventuelles relations entre métaux : origine commune, distribution homogène, comportement identique vis-à-vis des processus physicochimiques, fractionnement similaire, influence de l'un sur l'autre (tableau 13).

**Tableau. 13 :** Matrice de corrélations entre les métaux des sédiments et les paramètres physicochimiques mesurés

Variables	carbonates	fraction < 63(um)	fraction > 63(um)	Mo	Cu	As	Pb	Zn	CE	PH
carbonates	<b>1</b>									
fraction < 63(um)	0,187	<b>1</b>								
fraction > 63(um)	-0,148	<b>-0,999</b>	<b>1</b>							
Mo	<b>0,465</b>	-0,374	0,400	<b>1</b>						
Cu	0,037	-0,128	0,125	-0,124	<b>1</b>					
As	<b>0,432</b>	0,299	-0,289	-0,290	-0,237	<b>1</b>				
Pb	-0,337	0,055	-0,068	<b>-0,411</b>	<b>0,748</b>	-0,321	<b>1</b>			
Zn	0,070	-0,108	0,098	<b>-0,430</b>	<b>0,772</b>	0,288	<b>0,609</b>	<b>1</b>		
CE	-0,068	<b>-0,449</b>	<b>0,455</b>	0,254	<b>0,673</b>	-0,416	<b>0,702</b>	0,400	<b>1</b>	
PH	<b>-0,736</b>	-0,001	-0,032	<b>-0,569</b>	<b>0,433</b>	-0,243	<b>0,721</b>	<b>0,441</b>	0,349	<b>1</b>

L'analyse du tableau 13 a permis de mettre en évidence :

Une bonne corrélation entre le plomb, le cuivre, et le zinc, par contre, l'arsenic ne présente pas de liaison avec aucun de ces métaux. L'arsenic serait donc lié, à une différente source de pollution que les autres métaux étudiés.

L'arsenic est l'unique ETM présentant une assez bonne corrélation avec les carbonates, tandis que les autres métaux, présentent une bonne corrélation avec la conductivité.

La matière organique est inversement proportionnelle au pH, en effet, l'oxydation de la matière organique mène vers une diminution du pH.

Tous les ETM présentent une mauvaise corrélation avec la matière organique, cette dernière est par conséquent, peu influente sur l'adsorption et l'accumulation des ETM dans les sédiments analysés.

#### • Significations des axes et analyse des données

D'après l'analyse des variables (Annexe III), cinq variables sont entièrement prise en compte par l'axe F1 : à savoir le cuivre, le plomb, le zinc, le pH et la conductivité électrique.

L'analyse relative à ces descripteurs (figure 33), montre que ces paramètres sont bien corrélés entre eux et avec la composante principale F1.

La position de ces descripteurs excentrée positivement sur la composante F1, témoigne d'un gradient de pollution des sédiments (croissant du pôle négatif vers le pôle positif de l'axe).

La seconde composante F2, exprime l'influence de la granulométrie ainsi que de la matière organique, on remarque que les ETM ont une liaison plus importante avec la fraction < 63µm, que la fraction grossière ou la matière organique, ceci montre le rôle majeur que joue la granulométrie dans l'adsorption des ETM.

La projection des individus sur le plan factoriel F1-F2 montre l'individualisation de 4 groupes principaux :

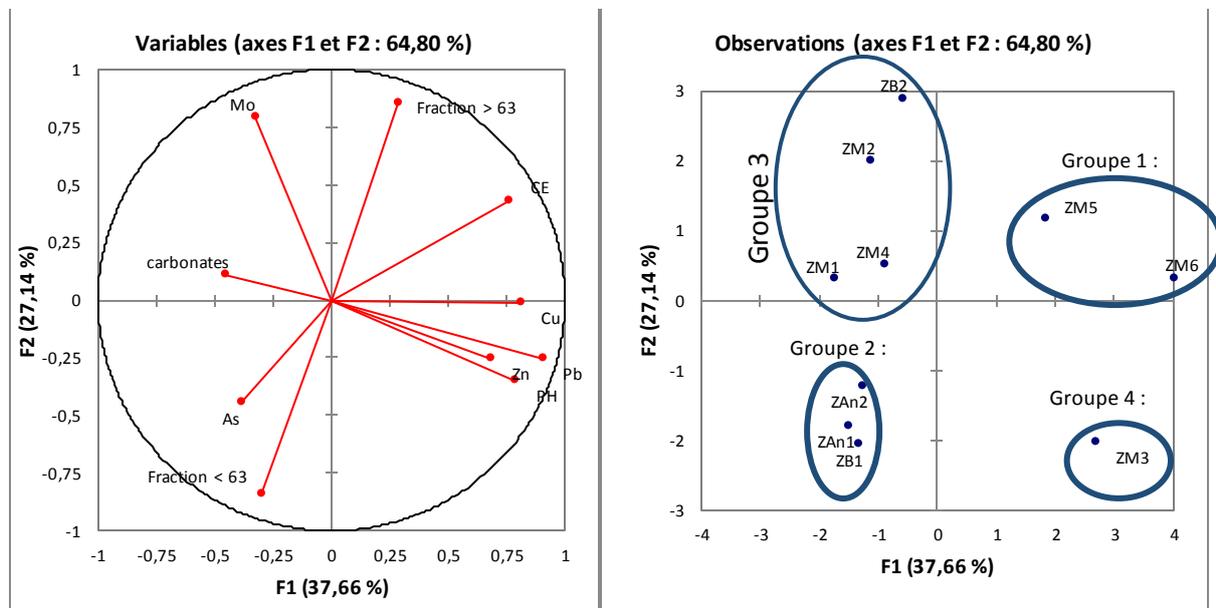
- Groupe 1 : situé sur le côté positif de l'axe F1 et constitué par les stations ZM5 et ZM6 est caractérisé par des teneurs élevées en ETM (Cu, Zn, Pb), ainsi qu'un pH et une conductivité électrique élevés.
- Groupe 2 : situé sur le côté négatif de l'axe F1 et constitué par les stations ZB1, ZAn1 et ZAn2, est caractérisé par de faibles teneurs en Cu, Pb et Zn, et une faible conductivité électrique, cependant, ces stations présentent d'importantes teneurs en arsenic.
- Groupe 3 : situé sur le côté négatif de l'axe F1, est constitué par les stations ZM1, ZM2, ZM4 et ZB2, comparé aux autres groupes, ces stations présentent des quantités élevées en matière organique, mais des teneurs assez faibles en ETM, puisqu'elles se positionnent négativement à l'axe F1.
- Groupe 4 : représenté par la station ZM3, caractérisé par les plus importantes teneurs en plomb, ce dernier présente une très bonne corrélation avec l'axe F1, ce groupe est aussi riche en fraction fine, et présente une conductivité électrique élevée.

L'analyse en composante principale révèle l'existence d'une corrélation négative entre la matière organique et les éléments (Pb et Zn), en effet, la complexation de ces éléments avec la

matière organique tend à augmenter leur solubilité, et par suite, diminuer leur accumulation au sein du sédiment (Reuter et Perdû, 1977).

Le pH est positivement corrélé aux éléments (Pb, Zn et Cu), ceci montre le rôle très important que joue le pH dans l'augmentation des teneurs en ETM et leur accumulation dans le sédiment.

L'arsenic quant à lui, il se trouve préférentiellement associé à la fraction granulométrique fine (Smedley et Kinniburgh, 2002), d'où leur corrélation positive.



**Figure. 33 :** Représentation des résultats d'analyse en composantes principales pour les sédiments

A : Projection des variables (ETM et propriétés physico-chimique) sur le plan F1-F2 ;

B : Projection des individus sur le plan F1-F2

### III.3. Comparaison des teneurs en métaux des sédiments étudiés avec ceux d'autres systèmes fluviaux

La comparaison des teneurs en métaux des sédiments étudiés avec ceux d'autres systèmes fluviaux se subdivise en deux parties : comparaison des teneurs de références ; Teneurs moyennes et polluants majeurs.

#### III.3.1. Comparaison des teneurs de références

La comparaison des stations de références est cruciale, en effet, elle permet d'apprécier le degré de contamination de la station de référence (ZM1 pour notre étude), avec celui d'autres stations de références, afin d'avoir une idée sur la nature d'apports lithologique en ETM.

Le tableau 14 montre que la station ZM1 présente des teneurs normales en cuivre et en zinc, cependant les teneurs en plomb et en arsenic sont largement supérieures à ceux observées pour les autres stations.

Cette augmentation peut être liée à une origine naturelle (agriculture, usage de matériaux contaminés), ou à une origine naturelle (lithologie).

On note aussi l'augmentation des teneurs comparé à ceux déterminées par El Hachimi (2006), approximativement à la même station, ceci montre un enrichissement de cette zone en ETM, surtout en plomb et en arsenic.

**Tableau. 14 :** Teneurs des éléments métalliques (ppm) rapportées dans la littérature pour des sédiments de cours d'eau

<b>Auteurs</b>	<b>Milieu d'étude</b>	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>As</b>
<b>M. Viel et J-P. Vernet (1982)</b>	Rivières la Versoix	38	0.3	34	150	25
<b>Kaimoussi, (1996)</b>	Oum R'bia-Maroc	50	0.3	50	40	-
<b>Belamie et Phelippot (1982)</b>	Bassin Parisien (France)	28	-	17	150	-
<b>Hakanson (1984)</b>	Kolbäcksan (Suède)	47	0.8	21	210	-
<b>Snoussi, (1980)</b>	Loukkos (Maroc)	14	-	18	70	-
<b>Bennasser et al. (2000)</b>	Bas Sebou (Maroc)	12	-	25	49	-
<b>Fekhaoui et al. (1993)</b>	Moyen Sebou (Maroc)	19	0.5	40	90	-
<b>Tahiri, et al. 2005</b>	estuaire de Bouregreg (Maroc)	17	0.02	21	61	-
<b>Jadal, et al. (2002)</b>	Bas Oum Erbia (Maroc)	0.4	0.08	80	178	-
<b>El Hachimi, (2006)</b>	Haute Moulouya (Oued Moulouya)	18.9	0.2	8.5	44.2	6
<b>Croute continental (Doelsch, 2004)</b>	-	8	0.098	75	80	-
<b>Baize (1997)</b>	Teneurs moyenne dans la croute terrestre	15	0.2	45	65	-
<b>Présente étude</b>	Haute Moulouya (Oued Moulouya)	97	-	27	59	120

### III.3.2. Teneurs moyennes et polluants majeurs

Les teneurs moyennes enregistrées pour les principaux métaux lourds ont été reportées dans le tableau 15 en regard des teneurs que l'on peut s'attendre à trouver en milieu non contaminé (teneurs naturelles), teneurs adaptées selon Davaud et al., (1980).

Les rapports teneur moyenne/teneur naturelle et teneur maximale/teneur naturelle mettent en évidence l'importance relative des différents polluants métalliques et donnent une idée globale du taux de contamination des stations étudiées.

Le plomb représente le contaminant majeur, suivi par l'arsenic, le zinc, et en dernier lieu, le cuivre. Cette séquence reflète l'influence de la mine de plomb de Zeïda, sur l'ensemble de la zone d'étude, ainsi, le plomb constitue l'élément le plus abondant, même d'un point de vue naturel, avec une teneur 224 fois supérieur à la teneur naturelle.

Les teneurs en arsenic ne sont pas aussi négligeables, en effet ces teneurs sont 19 fois plus supérieures à la teneur naturelle.

Les teneurs en cuivre restent inférieure à la teneur naturelle, et ne posent par conséquent aucun problème environnemental, tandis que le zinc, a un rapport teneur max/teneur naturelle

2 fois supérieurs à la teneur naturelle, ce qui induit une contamination moyenne des sédiments par le zinc.

**Tableau. 15 :** Comparaison des teneurs moyenne avec les teneurs naturelles du plomb, cuivre, arsenic et du zinc

	<b>Moyenne</b>	<b>Ecart-type (n-1)</b>	<b>Teneur max.</b>	<b>Teneur min.</b>	<b>Teneur naturelle</b>	<b>Moyenne/teneur naturelle</b>	<b>Teneur max. / teneur naturelle</b>
<b>Cu (ppm)</b>	28,700	8,420	40,000	13,000	50,000	0,574	0,8
<b>As (ppm)</b>	186,000	84,222	390,000	110,000	20,000	9,3	19,5
<b>Pb (ppm)</b>	2404,900	4214,655	11200,000	52,000	50,000	48,098	224
<b>Zn (ppm)</b>	86,600	24,595	130,000	56,000	60,000	1,44	2,17

### **Conclusion :**

Les résultats de cette étude sur la variation spatiale des concentrations en éléments traces métalliques Cu, Pb, Zn et As dans les sédiments de l'oued Moulouya et du barrage Hassan II au voisinage de la mine abandonnée Zeïda dans la Haute Moulouya, montrent que la pollution est maximale dans les sédiments et la plus forte contamination est due au plomb et à l'arsenic et à un moindre degré au zinc, et au cuivre, que ce soit dans l'oued Moulouya ou dans le barrage. Les sédiments constituent une réserve potentielle de polluants.

## Conclusion générale et recommandations

Ce travail a porté sur le diagnostic de la contamination des sédiments par les éléments traces métalliques (Pb, Zn, Cu, As) de l'Oued Moulouya et du barrage Hassan II, au voisinage de la mine de Zeïda siège de l'exploitation intensive du minerai de plomb pendant plus de 13 ans (1972/1985). Cette dernière actuellement abandonnées sans réhabilitation, constitue une menace permanente pour l'environnement en général et pour les eaux de surface en particulier ainsi que pour les riverains, surtout suite à l'abandon de digues de résidus de traitement métalliquement contaminées.

Les analyses effectuées ont concernés les sédiments de surface (0-5 et 5-10 cm ; 10 points d'échantillonnage) intégrant donc les apports récents, et ont permis en premier lieu de caractériser les sédiments :

- particules en majorité de granulométrie fine (< 63µm)
- riche en carbonates
- pauvre en matière organique
- influence de la lithologie sur la composition minéralogique (granites, argiles, grès)

L'analyse des ETM a permis de mettre en évidence, une contamination importante au voisinage du centre minier de Zeïda, essentiellement liée au plomb.

En effet, la variation spatiale des ETM montre une augmentation des teneurs en plomb en aval direct de la mine, dépassant de loin les teneurs enregistrées en amont de la mine, ceci induit que la principale source de contamination par le plomb n'est autre que les résidus de traitement.

La comparaison des teneurs en plomb enregistrées dans la majorité des stations avec les teneurs normales a permis de détecter une contamination assez répandue. L'arsenic quant à lui, atteint ses valeurs maximales aux stations de l'Oued Ansegmir, ainsi qu'au barrage Hassan II, ces teneurs sont en effet, supérieures à celles observées en aval des résidus miniers. Le zinc ainsi que le cuivre atteignent leurs valeurs maximales en aval de la mine des rejets miniers, ce qui reflète l'apport en ETM de ces derniers vers les stations en aval.

Cependant, on remarque que presque toutes les stations présentent des indices de contaminations supérieurs à 1, ce qui indique que la zone étudiée, souffre d'une pollution métallique avancée, surtout en plomb et en arsenic, suivi par le zinc puis le cuivre.

Cette contamination est favorisée par les conditions physico-chimiques du milieu, en effet, le pH alcalin des eaux favorise la précipitation des ETM et limite leur libération dans les eaux, ceci induit un enrichissement intense en ETM des sédiments.

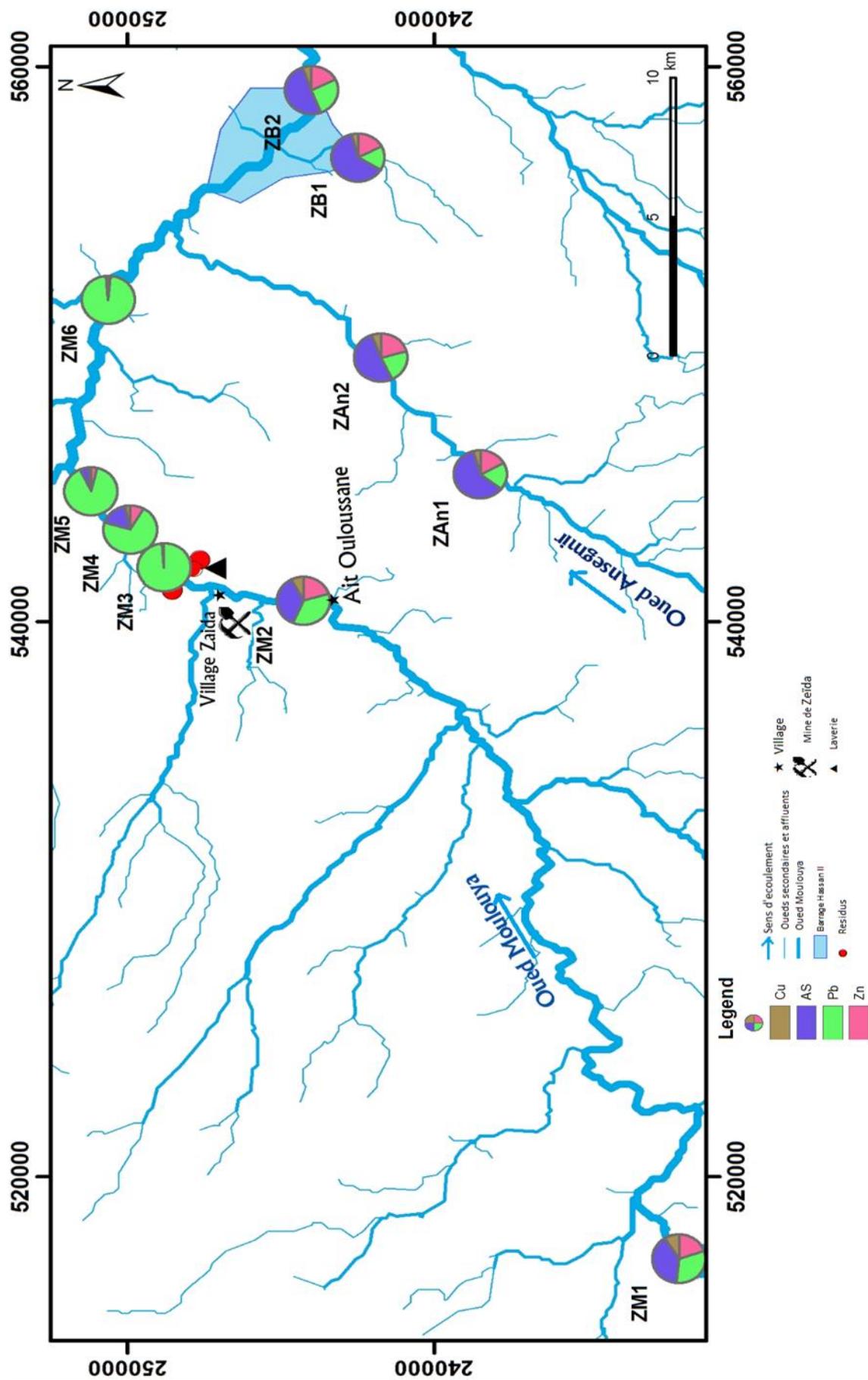
Le danger réside, dans le fait que ces ETM peuvent être libérés vers la colonne d'eau suite à la modification des propriétés hydrodynamique et/ou physico-chimique du milieu, une telle libération serait catastrophique vu les teneurs enregistrées, surtout pour les sédiments en aval de la mine, sachant que l'Oued Moulouya, constitue l'unique source d'irrigation et d'alimentation en eau pour la majorité des riverains.

Concernant les sédiments contaminés, leur remise en suspension ou leur réutilisation reste impossible, du fait qu'ils sont dangereux, étant métalliquement pollués, il faut songer à d'autres alternatives, tel que le curage pour leur dépollution, voir même, l'extraction de ces sédiments en vue d'exploiter les ETM qui y sont piégés, surtout au voisinage du centre minier, où les teneurs sont extrêmement élevées.

Une dépollution totale des sédiments reste très difficile à effectuer cependant, on peut toujours s'attaquer à la source de contamination.

En effet, la réhabilitation des résidus de traitement doit avoir lieu, une valorisation est possible vu les teneurs élevées en ETM qui y sont contenues. Des études plus approfondies doivent voir le jour pour déterminer si, une solution naturelle peut être entreprise, tel que l'implantation de végétaux à forte absorption, ou au minimum, pour fixer les résidus et limiter leur dispersion.

En conclusion, les sédiments présentent le danger majeur, vu l'accumulation excessive des ETM, et le risque de relargage à la moindre modification des conditions du milieu. Des recherches approfondies sur ce compartiment doivent être réalisées pour mieux contrôler le devenir des métaux, et leur incidence sur la zone d'étude.



**Figure. 35 :** carte de la répartition des éléments traces métalliques (Pb, Cu, As et Zn) dans les sédiments de surface



## **Références bibliographiques**

**Ahamrouni, J.** 1996. Erosion hydrique dans le bassin versant de la Moulouya (Maroc Oriental) : Recherche des zones sources d'envasement de la retenue du barrage Mohamed V. Thèse de 3<sup>ème</sup> cycle, Univ. Cheikh Anta Diop., Fac. Sci. Tech., Dakar, Sénégal, 147 p.

**Alloway, B.J. et Ayres, D.C.,** 1997. *Chemical Principles of Environmental Pollution. Blackie Academic and Professional, an imprint of Chapman and Hall.* **In : Salvarredy, M. (2008).** - Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers : Approches géochimique, minéralogique et hydrochimique. Thèse de doctorat, Univ. Toulouse, 379 p.

**Amade E.** 1965. Le gisement de plomb de Zeïda et de Boumia. **In : Mouttaqi, A., Rjimati, E.C., Maacha, L., Michard, A., Soulaïmani, A., & Ibouh, H.** - Nouveaux guides géologiques et miniers du Maroc : Les principales mines du Maroc. Volume 9, N° 564, Rabat, 2011, 373 p.

**Amrani, A.** 2007. Apport des données couplées d'imagerie satellitaire ETM+ de Landsat 7 et modèle numérique de terrain appliqués à l'étude morphogénétique de la Haute et Moyenne Moulouya (Maroc). Thèse de doctorat es Sci., Univ. Mohamed V-AGDAL, Fac. Sci., Rabat, 216 p.

**Audry S.,** 2003. Bilan géochimique du transport des éléments traces métalliques dans le système fluvial anthropisé Lot-Garonne-Gironde. Thèse à l'Université Bordeaux I. 413 p.

**Axtmann, E.V. & Luoma, S.N.** 1991. *Large-scale distribution of metal contamination in the fine-grained sediments of the Clark Fork river.* **In : EL Hachimi M.L.** – Les districts miniers Aouli-Mibladen-Zeïda, abandonnées dans la Haute Moulouya (Maroc) : potentiel de pollution et impact sur l'environnement. Thèse de doctorat, Univ. Ibn Tofail, Fac. Sci., Kenitra, 2006, 157 p.

**1/ Azimi, S., Rocher, V., Muller, M., Moïlleron, R., et Thévenot, D., Rousseau C., Leblond, S., 2/ Colin, J.L., 3/ Coquery, M., et Blanchard, M., Garban, B., Ollivon, D., Teil, M.-J., et Chevreuil, M.** Retombées atmosphériques en micropolluants : bilan et modes de dépôt des métaux (métaux lourds et mercure) et des polluants organiques persistants (hydrocarbures aliphatiques et aromatiques et polychlorobiphényles) sur le bassin de la Seine. 1/ Cereve, Univ. Paris XII-Val de Marne, 2/ LISA, Université Paris XII-Val de Marne, 3/ INERIS, LHE, EPHE, 2003.

**Baier R.W., Healy, M.L.** 1977. Partitioning and transport of lead in lake Washington. J. Environ. Qual., 6: 291–296. **In : El Morhit, M.** 2009.-hydrochimie, éléments traces métalliques et incidence écotoxicologique sur les différentes composantes d'un écosystème estuarien (Bas Loukkos). Thèse de doctorat, Univ. Mohammed V, fac. Sci., Rabat, Maroc, 212 p

**Baize, D.** 1997. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Editions Quae, 408 pages.

**Baize, D.** 2006. Cours ETM Poitiers : Cours sur les éléments traces dans les sols. Univ. Poitiers, France. [En ligne]. Disponible sur : [http://www.denis-baize.fr/index.php?option=com\\_content&task=view&id=5&Itemid=9](http://www.denis-baize.fr/index.php?option=com_content&task=view&id=5&Itemid=9).

**Belamie, R. et Phelippot S.** 1982. Étude du niveau de contamination des sédiments de plusieurs cours d'eau du bassin parisien par les métaux et les composés organochlorés. CEMAGREF, division qualité des eaux, pêche et pisciculture, Rap. 16, pp. 1-8

**Belamie R, Phelippot S.** 1982. Etude de la contamination des sédiments de plusieurs cours d'eau du bassin parisien (France) par les métaux et les composés organochlorés. CEMAGREF 16, pp. 1-8.

**Bennasser L, Fekhaoui M, Mameli O, Melis P.** 2000. Assessment of the metallic contamination of the low Sebou sediments. Water Res. 31, pp. 859-867.

**Billon, G.,** 2009. Les échanges eau-sédiment : devenir, mobilité et toxicité des métaux. Univ. Lille 1, Sci. Tech., France, 28 p.

**Blanquet, J.P., Bonomet, V., Coquery, M., Gaudillot, A., Gondelle, F., Houeix, N., LE Goff, F., Magaud, H., Meunier, L., Sanchez, W.** 2004. Devenir et comportement des métaux dans l'eau : biodisponibilité et modèles BLM, Rapport technique, INERIS, Paris, France, 85 p.

**Bouabdli, A., Saidi, N., M'rabet, S., Escarre, J., Leblanc, M.** 2005. Oued Moulouya : Vecteur de transport des métaux lourds (Maroc). Rev. Sci. Eau, pp. 199-213.

**Bouasria, S.,** 2008. Géochimie des métaux lourds dans les eaux et les sédiments du littoral marocain entre Sidi Bouzid et Souira Qdima. Thèse de doctorat, Univ. Mohamed V-Agdal, Fac. Sci. Rabat, 195 p.

**Bonnet C.** 2000. Développement de bioessais sur sédiments et application à l'étude, en laboratoire, de la toxicité de sédiments dulçaquicoles contaminés. Thèse de Doctorat, Université de Metz, France.

**Burdige J.D.,** 2006. Geochemistry of marine sediments. Princeton university press. Princeton and Oxford. 609 p.

**Gabelle, C.** 2006. Etude de la contamination des sédiments par les métaux dans les canaux et rivières du nord de la France. UNIV. SCI. et TECH. de Lille, 207 p.

**Callender, E.** 2003. Heavy Metals in the Environment-Historical Trends. US Geological Survey, Westerly, RI, USA, pp. 67-100.

**Capilla, X.** 2003. Dynamique du transfert du cadmium et du zinc au sein de dépôts de sédiments et de curage végétalisés. Thèse de doctorat d'état es Sci. Agr., Inst. Nat. Poly. De Lorraine, Ecole Nat. Sup. d'Arg. et des Ind. Alim., Lorraine, France, 182 p.

Centre de Recherche sur la Matière Divisée. CNRS, Univ., d'Orléans, 2010, France. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.crmd.cnrs-orleans.fr/IMG/pdf/DRX.pdf>

**Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec et ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec,** Détermination de la matière organique par incinération : méthode de perte de feu (PAF), MA. 1010 – PAF 1.0, Ministère de l'Environnement du Québec, 2003, 9 p.

**Citeau, L.** 2004. Etude des colloïdes naturels présents dans les eaux gravitaires de sols contaminés : relation entre nature des colloïdes et réactivité vis-à-vis des métaux (Zn, Cd, Pb, Cu). Thèse de doctorat, Inst. Nat. Agronomie, Paris-Grignon (INA-PG), France, 273 p.

- Dean, J. G., Bosqui, F.L. et Lanouette, V.H.** 1972. Removing heavy metals from waste water. Environ. Sci. Technol., Nature, Vol. 6, pp. 518-522.
- Dechelette, M., et Palvadeau, S.,** 2004. Mise en place d'une campagne de prélèvement : projet ecodyn. Maitrise de chimie, Univ. Toulon et du Var, Fac. Sci. et Tech., France, 28 p.
- Diot, H. et Bouchez J.L.,** 1989. *Les granitoïdes hercyniens de la Haute-Moulouya (Maroc): leur structure primaire déduite de l'ASM. Indications sur leur mise en place.* **In :** **Oukemeni, D.** Géochimie, géochronologie (u-pb) du pluton d'Aouli et comparaisons géochimiques avec d'autres granitoïdes hercyniens du Maroc par analyse discriminante. Thèse es Sci., Univ. Québec, Montréal, 1993, 126p.
- D.M.R** 1990. Panorama de l'industrie minière. **In :** **El Hachimi, M.L., El Founti, L., Bouabdli, A., Saïdi, N., Fekhoui M., et Tassé, N.** - Pb et As dans des eaux alcalines minières : contamination, comportement et risques (mine abandonnée de Zeïda, Maroc). Revue des sciences de l'eau, vol. 20, n° 1, 2007, pp. 1-13.
- D.M.R.** 1990. Panorama de l'industrie minière. **[En ligne].** Disponible sur : <http://club.topsage.com/thread-2897199-1-1.html>.
- Dresnay, R.** 1979. *Sédiments jurassiques du domaine de la chaîne atlasique du Maroc.* **In :** **Amrani, A.** 2007. Apport des données couplées d'imagerie satellitaire ETM+ de Landsat 7 et model numérique de terrain appliques a l'étude morphogénétique de la Haute et Moyenne Moulouya (Maroc). Thèse de doctorat es Sci., Univ. Mohamed V-AGDAL, Fac. Sci., Rabat, 216 p.
- Duchaufour, Ph.** 1995 Pédologie, sol, végétation, environnement. 4<sup>e</sup> édition, Masson, Paris, 342 p.
- Dyrssen, D. et Wedborg, M.** 1980. Major and minor elements, chemical speciation in estuaire waters. **In:** **Bouasria, S.** – Géochimie des métaux lourds dans les eaux et les sédiments du littoral marocain entre Sidi Bouzid et Souira Qdima. Thèse de doctorat, Univ. Mohamed V - Agdal, Fac. Sci. Rabat, 2008, 195 p.
- EBF.**(2010). Paramètres de mesures de la pollution des eaux urbaines, **[En ligne].** Disponible sur : <http://www.envirobf.org/eau/422-parametres-de-mesures-de-la-pollution-des-eaux-urbaines.html>
- El Adnani M.** (2008) : Evaluation du comportement à long terme des résidus des mines de Hajjar de DraaSfar (Marrakech, Maroc) et leurs impacts sur les écosystèmes avoisinants. Thèse de doctorat d'état Es Sci., Fac. Sci. Semlalia Marrakech, 279p.
- EL Hachimi M.L.** 2006. Les districts miniers Aouli-Mibladen-Zeïda, abandonnées dans la Haute Moulouya (Maroc) : potentiel de pollution et impact sur l'environnement. Thèse de doctorat, Univ. Ibn Tofail, Fac. Sci., Kenitra, 157 p.
- El Hachimi, M.L., El Founti, L., Bouabdli, A., Saïdi, N., Fekhoui M., et Tassé, N.** 2007. Pb et As dans des eaux alcalines minières : contamination, comportement et risques (mine abandonnée de Zeïda, Maroc). Revue des sciences de l'eau, vol. 20, n° 1, pp. 1-13.
- El Hachimi, M.L., Bouabdli, A., Fekhaoui, M.** (2013). Les rejets miniers de traitement : caractérisation, capacité polluante et impacts environnementaux, mine Zeïda, mine Mibladen, Haute Moulouya (Maroc). Env. et techn. Déchets Sciences et Techniques - N°63, supplément

au n° 323, pp. 04-45.

**Emberger, A.** 1965. Introduction à l'étude des minéralisations plombifères de la Haute Moulouya, Maroc. Colloque sur des gisements stratiformes de plomb, zinc et de manganèse du Maroc. Notes & M. Serv. Géol. Maroc, N° 181, pp. 167-174.

**Faguet, D.** 1982. *Influence des substances humiques sur les formes dissoutes et particulières de quelques métaux (Zn, Fe, Co, Mn) dans les milieux marins et lagunaire.* **In: Bouasria, S.** – Géochimie des métaux lourds dans les eaux et les sédiments du littoral marocain entre Sidi Bouzid et Souira Qdima. These de doctorat, Univ. Mohamed V - Agdal, Fac. Sci. Rabat, 2008, 195 p.

**Fekhoui M., et Tassé, N.** Pb et As dans des eaux alcalines minières : contamination, comportement et risques (mine abandonnée de Zeïda, Maroc). Revue des sciences de l'eau, vol. 20, n° 1, 2007, pp. 1-13.

**Fekhaoui M, Abouzaid H, Foutlane A.** 1993. Etude de la contamination métallique des sédiments et des algues de l'Oued Sebou soumis aux rejets de la ville de Fès (Maroc). Bull. Ins. Sci. Rabat, 17, pp. 13–20.

**Forstner, U. et Wittmann, G.T.W.** 1979. Métal pollution in the aquatic environment. Metal pollution in the aquatic environment. Springer-Verlag. Berlin. Heidelberg. New York, 487p.

**Förstner, U.** 1987. *Meta speciation in solid wastes. Factors affecting mobility.* **In : Naoura, J., et Benaabidate, L.** - Monitoring of heavy metals in the sediments of the Inaouene River, research article, Morocco, Vol. 17(3),2011, pp. 193-202.

**Garret, G. G.** 2000. *Natural sources of metals to the environment: Human & Ecological Risk Assessment.* **In: Blanquet, J.P., Bonomet, V., Coquery, M., Gaudillot, A., Gondelle, F., Houeix, N., LE Goff, F., Magaud, H., Meunier, L., Sanchez, W.** - Devenir et comportement des métaux dans l'eau : biodisponibilité et modèles BLM, Rapport technique , INERIS , Paris, France, 2004 , 85 p.

**Gervais, C.** 1999. Evaluation environnementale des perspectives de valorisation en BTP de scories de première fusion de plomb et de zinc. Thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 176 p.

**Gharbi, T.L.** 2008. Rôle de la matière organique sur le devenir des polluants métalliques. Cas de la fertirrigation d'un sol en climat méditerranéen. Thèse de doctorat, Université du Sud Toulon-Var, 225 p.

**Ghanem, C.A.** 2008. "Spéciation" des trois éléments trace mercure, plomb et cadmium dans les sédiments marins des zones côtières libanaises.

**Hakanson L.** 1984. Metals in fish and sediment from the river Kolbäcksan water system, Sweden. Arch. Hydrobiol. 101, pp. 373–400.

**Hakkou, R., Benzaazoua M. et Bussièrre B.** 2008. Acid mine drainage at the abandoned Kettara Mine (Morocco): 1. Environmental Characterization. Mine water and Env., (27), pp. 145-159.

**Hakkou, R.** 2001. La décharge publique de Marrakech : caractérisation des lixiviats, étude de leur impact sur les ressources en eau et essais de leur traitement. Thèse de doctorat d'état es Sci., Univ. Cadi ayyad, Fac. Sci. Thec., Marrakech, Maroc, 134 p.

**Handbook Geochemistry** 1977. Ed: K.H. Wedepohl, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, ed 1977.

**Haut-Commissariat au Plan, Direction Régionale d'Oujda** 2012. Monographie de la région de l'Oriental 2010, 93p.

**Haut-Commissariat au Plan, Recensement général de la population et de l'habitat**, 2004. Population légale du Maroc., 68 p.

**Hem, J.D.**, 1972. *Chemistry and occurrence of cadmium and zinc in surface water and ground water*. **In** : **Salvarredy, M.** - Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers : Approches géochimique, minéralogique et hydrochimique. Thèse de doctorat, Univ. Toulouse, 2008, 379 p.

**Iavazzo, P., Adamo, P, Boni, M, Hillier, S. Zampella, M.** 2011. Mineralogy and chemical forms of lead and zinc in abandoned mine wastes and soils: An example from Morocco. *Journal of Geochemical Exploration*, Elsevier, pp. 57-67.

**Ibouhouten H., Zielhoffer, C., Mahoubi, R., Kamel, S., Linstadter, J., Mikdad, A., Bussman, J., Werner P., Joachim W. Härtling et Katrin Fenech.** 2009. Archives alluviales holocènes et occupation humaine en Basse Moulouya (Maroc nord-oriental) [**en ligne**]. Disponible sur: <http://geomorphologie.revues.org/7812>.

**INERIS.** 2010. Principaux paramètres de caractérisation de la pollution des eaux et de leurs incidences sur l'environnement. [**En ligne**]. Disponible sur : <http://www.basse-normandie.developpement-durable.gouv.fr/principaux-parametres-de-a187.html>

**Jadal M, El Yachioui M, Bennasser L, Fekhaoui M, Foutlane A.** 2002. Qualité des eaux de l'estuaire de l'oued Oum Erbia (Maroc) et influence de la dynamique marégraphique. L'eau, l'industrie, les nuisances 256, pp. 59–66.

**James, R. O.** 1978. *Effects of Heavy Metals on Aquatic Life*. **In** : **Naoura, J., et Benaabidate, L.** -Monitoring of heavy metals in the sediments of the Inaouene River, research article, Morocco, Vol. 17(3),2011, pp. 193-202.

Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon. 2007. Géochimie environnementale: Les métaux lourds et autres polluants inorganiques. Univ. Avignon, France.

**Lambert, J.L.** 1987. L'évolution des modèles de consommation alimentaire en France. Paris, Lavoisier. 140 p.

**Laville, E., Feddan, B. Pique, A.** 1991. Déformation synschisteuse jurassique, orogénèse cénozoïque : deux étapes de la structuration du Haut Atlas (Maroc). C. R. Acad. Sci., Paris, t. 312, série II, pp. 1205-1211.

**Lévêque, C.** 1996. Ecosystèmes aquatiques, Paris, Hachette, 160 p.

Les Bassins Hydrauliques du Maroc : Le Bassin Hydraulique de la Moulouya., pp.257-301., [en ligne]. Disponible sur: [www.water.gov.ma/userfiles/file/11\\_Moulouya-déf.pdf](http://www.water.gov.ma/userfiles/file/11_Moulouya-déf.pdf).

**Lesven, L.**, 2008. Devenir des éléments traces métalliques au sein du sédiment, un compartiment clé de l'environnement aquatique. Thèse de doctorat, Univ. Sci. Et Techn. Lille., France, 158 p.

**Li, Y.-H., Burkhardt, L. et Teraoka, H. (1984).** - Desorption and coagulation of trace elements during estuarine mixing. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(10): 1879-1884.

**Lum, R.R.**, 1987. *Cadmium in freshwaters: the Great Lakes and St. Lawrence River*. **In** : **Salvarredy, M.** - Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers : Approches géochimique, minéralogique et hydrochimique. Thèse de doctorat, Univ. Toulouse, 2008, 379 p.

**Lydia, N.** 2010. – Mise au point d'une technique d'extraction des éléments traces métalliques dans les produits de la mer et leurs dosages par spectrophotométrie d'absorption atomique. Magister en médecine vétérinaire, Univ. Mentouri de Constantine, Fac. Sci., Algérie, 103 p.

**Makhoukh, M., Sbaa, M., Berrahou, L., et Vanclooster, V.** 2011. Contribution à l'étude de l'impact d'un site minier abandonné dans la haute : Moulouya sur la qualité de l'Oued Moulouya, Maroc. *Afrique Sci.*, 07(3), pp. 33-48.

**Mahan, B.H.**, 1987. *Química. Curso Universitario. Fondo Educativo Interamericano*. **In** : **Salvarredy, M. (2008).** - Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers : Approches géochimique, minéralogique et hydrochimique. Thèse de doctorat, Univ. Toulouse, 379 p.

**Mc Carthy, M., Hedges, J., Benner, R.** 1996. *Major biochemical composition of dissolved high molecular weight organic matter in seawater*. **In** : **Dechelette, M., et Palvadeau, S.** – Mise en place d'une campagne de prélèvement : projet ecodyn. Maitrise de chimie, Univ. Toulon et du Var, Fac. Sci. et Tech., France, 2004, 28 p.

**Melhaoui, M et J.P Boudot.** 2009. Diagnostic de la biodiversité aquatique dans le Bassin Hydraulique de la Moulouya Projet ABHM/UICN. Rapport d'expertise. UICN Med., 113 p.

**Michard, A.** 1976. *Eléments de géologie marocaine*. **In** : **Saadi, Z.** - Les bassins Triasico-Jurassiques de la Haute et de la Moyenne Moulouya et de la bordure méridionales du Moyen Atlas (Maroc). Contexte sédimentaire et marqueurs géodynamiques. Thèse de doctorat d'état es Sci., Univ. Mohamed V-AGDAL, Fac. Sci., Rabat, (2012), 347 p.

**Morgan, J.J. et Stumm, W.** 1964. *The role multivalent metal oxides in limnological transformations, as exemplified by iron and manganese*. **In**: **Bouasria, S.** Géochimie des métaux lourds dans les eaux et les sédiments du littoral marocain entre Sidi Bouzid et Souira Qdima. These de doctorat, Univ. Mohamed V - Agdal, Fac. Sci. Rabat, 2008, 195 p.

**Mouttaqi, A., Rjimati, E.C., Maacha, L., Michard, A., Soulaïmani, A., & Ibouh, H.** 2011. Nouveaux guides géologiques et miniers du Maroc : Les principales mines du Maroc. Volume 9, N° 564, Rabat, 373 p.

- Naji, M.** 2004. Les minéralisations plombo-barytiques du district de la Haute Moulouya : contexte géologique, contrôle tectonique et modèle de mise en place – gisements d'Aouli – Mibladen, Maroc. Doctorat national. Univ. Mohammed V. Rabat. pp. 1 – 30.
- Naoura, J., et Benaabidate, L.** 2011. Monitoring of heavy metals in the sediments of the Inaouene River, research article, Morocco, Vol. 17(3), pp. 193-202.
- Nryagu J.O et Pcyna J.M** 1988. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature*, (333), pp. 134-139.
- Oukemeni, D.** 1993. Géochimie, géochronologie (u-pb) du pluton d'Aouli et comparaisons géochimiques avec d'autres granitoïdes hercyniens du Maroc par analyse discriminante. Thèse es Sci., Univ. Québec., Montréal, 126p.
- Petard, J.** 1993. Les méthodes d'analyse : Analyse de sols. Laboratoire commun d'analyse, Tome1, N°5, ORSTOM, France, 194 p.
- Quantin, C.** 2001. Incidence de la biodégradation des matières organiques sur le devenir des métaux et des contaminants organiques dans un sol nickélicifère et un sédiment de rivière. Thèse de Doctorat, Université Henry Poincaré - Nancy I, France.
- Raynal, R.** 1961. Plaines et piémonts du bassin de la Moulouya (Maroc Oriental). **In** : **Amrani A.** - Apport des données couplées d'imagerie satellitaire ETM+ de Landsat 7 et model numérique de terrain appliques a l'étude morphogénétique de la Haute et Moyenne Moulouya (Maroc). Thèse de doctorat es Sci., Univ. Mohamed V-AGDAL, Fac. Sci., Rabat, 2007, 216 p.
- Reece, D. E., Felkey, J. R. & Wai, C. M.** 1987. *Heavy metal pollution in sediment of "Coeur d'Alène" river.* **In** : **EL Hachimi M.L.** – Les districts miniers Aouli-Mibladen-Zeïda, abandonnées dans la Haute Moulouya (Maroc) : potentiel de pollution et impact sur l'environnement. Thèse de doctorat, Univ. Ibn Tofail, Fac. Sci., Kenitra,. 2006, 157 p.
- Reuter, J.H. et Perdue, E.M.** 1977. Importance of heavy metal –organic matter interactions in natural waters. *Géochimie. Cosmochim. Acta.* 28, pp. 32-334.
- Rhoujjati, A.,** 2007. Changements paléo-environnementaux et paléo-climatiques depuis 21.000 ans <sup>14</sup>C dans le Moyen Atlas marocain : les lacs Ifrah et Iffer. Thèse de doctorat d'état es Sci., Univ. Chouaïb Doukkali, Fc. Sci. El Jadida, Maroc, 153 p.
- Riad, S.** 2003. Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc. Thèse en cotutelle. Univ. Sci. Et Tech. Lille., Univ. Ibnou Zohr., Agadir, 147p.
- Rose, A.W., H.E. et Webb, J.S.** 1979. *Geochemistry in mineral exploration.* **In**: **Bouasria, S.** Géochimie des métaux lourds dans les eaux et les sédiments du littoral marocain entre Sidi Bouzid et Souira Qdima. Thèse de doctorat, Univ. Mohamed V - Agdal, Fac. Sci. Rabat, (2008), 195 p.
- Rollin, C., Quiot, F., Badreddine, R., Bour, O., Bureau, J., Burnol, A., Duro, L., Grive, M.** 2006. Eléments traces métalliques : Guide méthodologique, Recommandations pour la modélisation des transferts des éléments traces métalliques dans les sols et les eaux souterraines. Rapport d'étude, INERIS, France, 119 p.

- Roy, P.S. et Crawford, E.A.** 1984. Heavy metals in contaminated Australian estuary - Dispersion and accumulation trend. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 19, pp. 341-358.
- Runnels, D.D., Sheperd, T.A. et Angino, E.E.** 1992. *Metals in water, determining natural background concentrations in mineralized areas.* **In** : **Salvarredy, M. (2008).** - Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers : Approches géochimique, minéralogique et hydrochimique. Thèse de doctorat, Univ. Toulouse, 379 p.
- Saadi, Z.** 2012. Les bassins Triasico-Jurassiques de la Haute et de la Moyenne Moulouya et de la bordure méridionales du Moyen Atlas (Maroc) : Contexte sédimentaire et marqueurs géodynamiques. Thèse de doctorat d'état es Sci., Univ. Mohamed V-AGDAL, Fac. Sci., Rabat, 347 p.
- Saeedi, M., Daneshvar, Sh., et Karbassi, A.R.** 2004. Role of riverine sediment and particulate matter in adsorption of heavy metals. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 1(2), pp. 135-140.
- Salvarredy, M.** 2008. Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers : Approches géochimique, minéralogique et hydrochimique. Thèse de doctorat, Univ. Toulouse, 379 p.
- Samira, A.** 1999. Les métaux lourds dans le bassin versant du Sebou: géochimie, sources de pollution et impact sur la qualité des eaux de surface. Thèse de doctorat national, Geosci. De l'Env., Univ. Ibn Tofail, Kenitra, Maroc, 133 p.
- Schmitt, J.M.** 1976. *Sédimentation, paléo-altération, géochimie et minéralisation en plomb de la série triasique de Zeïda.* **In** : **El Hachimi, M.L., El Founti, L., Bouabdli, A., Saïdi, N., Fekhoui M., et Tassé, N.** - Pb et As dans des eaux alcalines minières contamination, comportement et risques (mine abandonnée de Zeïda, Maroc). *Revue des sciences de l'eau*, vol. 20, n° 1, 2007, pp. 1-13.
- Serpaud, B., Al-Shukry, R., Casteignau, M. et Matejka., G.** 1994. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 7(4), pp. 343-365.
- Sigg, L., Stumm, W., Berha, P.** 1992. *Chimie des milieux aquatiques.* . **In** : **Dechelette, M., et Palvadeau, S.** – Mise en place d'une campagne de prélèvement : projet ecodyn. Maitrise de chimie, Univ. Toulon et du Var, Fac. Sci. et Tech., France, 2004, 28 p.
- Singer, P.C.**, 1977. Influence of dissolved organics in the distribution, transport and fate of heavy metals in aquatic systems. **In** : **Samira, A.** 1999. Les métaux lourds dans le bassin versant du Sebou: géochimie, sources de pollution et impact sur la qualité des eaux de surface. Thèse de doctorat national, Geosci. De l'Env., Univ. Ibn Tofail, Kenitra, Maroc, 133 p.
- Smedley, P.L., Kinniburgh D.G.** 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry* (17), pp. 517-568.
- Snoussi, M.** 2005. *Revue de quelques éléments de base pour l'évaluation des débits environnementaux en Basse Moulouya.* Rapport à l'Union mondiale pour la nature (UICN), 14 p.

**Snoussi M.** 1980. Géochimie et minéralogie des sédiments fins de l'estuaire du Loukkos (côte atlantique marocaine), contribution à l'étude d'un écosystème estuarien. Thèse d'université, Rabat. 95 p.

**Tack, F.M.G. et Verloo, M.G.** 1995. Chemical speciation and fractionation in soil and sediment heavy metal analysis. **In** : **Lesven, L.** – Devenir des éléments traces métalliques au sein du sédiment, un compartiment clé de l'environnement aquatique. Thèse de doctorat, Univ. Sci. Et Techn. Lille., France, 2008, 158 p.

**Tahiri, L., Bennasser, L., Idrissi, L., Fekhaoui, M., EL Abidi, A., Mouradi, A.** 2005. Contamination métallique de *mytilus galloprovincialis* et des sédiments au niveau de l'estuaire de Bouregreg (Maroc). *Water Qual. Res. J. Canada*, 40(1), pp. 111–119.

**Tessier, E.**, 2012. Diagnostic de la contamination sédimentaire par les métaux/metalloïdes dans la rade de Toulon et mécanismes contrôlant leur mobilité. . Thèse de doctorat d'état, Univ. Du Sud Toulon Var, France, 272 p.

**Tessier, A., Fortin, D., Berzile, N, Deviutre, R.R. et Leppard, G.G.** 1996. Metal sorption to diagenetic iron and manganese oxyhydroxides and associated organic matter: Narrowing the gap between field and laboratory measurements. *Géochimie. Cosmochim. Acta*, Vol. 60, pp. 387-404.

**Thévenot, D.R., Lestel, L., Tusseau-Vuillemin, M.H., Gonzalez, J.L., Meybeck, M.**, 2009. Les métaux dans le bassin de la Seine Collection du programme PIren-Seine.

**United States Agency for International Développement et DAI. (2010).** Morocco economic competitiveness: Analyse et identification des besoins pour des systèmes d'information et de gestion des ressources en eau pour l'agence du bassin hydraulique et de l'ORMVA Bassin Hydraulique de la Moulouya et d'OUM Er-rbia., 62 p.

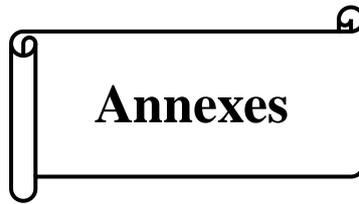
**Viel, M., Vernet, J-P.** 1982. – Contamination par les métaux lourds des sédiments des affluents suisses du leman et des rivières du canton de Genève. *Labo. Limnologie*, Geneve, pp. 111-133.

**Villeneuve M., Bussiere B., Benzaazoua M., Aubertin M. et Monroy, M.** 2003. The influence of kinetic test type on the geochemical response of low acid generating potential tailings. *Tailings and waste 03*, Vail, CO. Sweets et Zeitlinger, lisse, pp. 269-279.

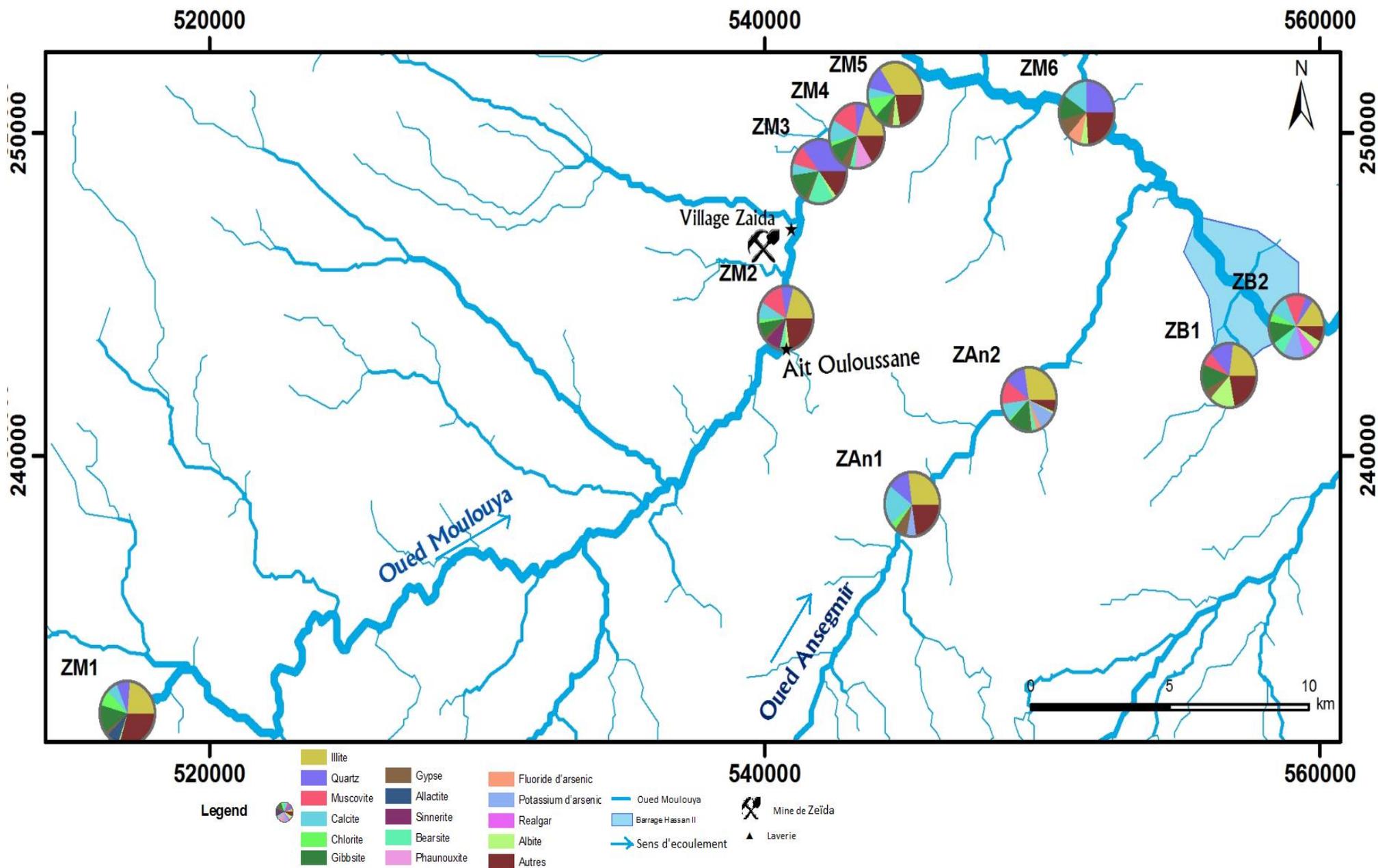
**Younger, P.L.**, 2000. Nature and practical implications of heterogeneities in the geochemistry of zinc-rich, alkaline mine waters in an underground F-Pb mine in the UK. *Applied Geochemistry*, 15(9), pp.1383-1397.

## Sites web:

- <http://www.cotebleue.org/pollagri.html>
- <http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/metaux/pb/te xpb.htm>
- <http://fr.wikipedia.org/wiki/Cadmium>
- <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=3678>
- <http://www.exploresmines.com/secteur-minier-type-mines.html>
- <http://cdhal.org/mines>
- <http://www.elaw.org/files/mining-eia-guidebook/Chapitre%201.pdf>



**Annexe I : Carte de répartition des minéraux les plus abondants dans les sédiments de surface**



**Annexe II : Résultat de l'analyse DRX des  
échantillons de sédiments en pourcentage  
semiquantitafs**

Minéral	Formules du mineral	ZM1	ZM2	ZM3	ZM4	ZM5	ZM6	ZB1	ZB2	ZAn1	ZAn2
Illite	$\text{Al}_3\text{H}_2\text{KO}_{12}\text{Si}_3$	23	21	-	19	31	-	22	15	29	27
Quartz	$\text{SiO}_2$	8	7	35	6	11	27	14	5	14	12
Muscovite	$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-	14	10	15	-	-	7	13	-	12
Calcite	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$	6	9	6	11	5	17	-	11	22	9
Chlorite	$\text{Mg}_{2.5}\text{Fe}_{1.65}\text{Al}_{1.5}\text{Si}_{2.2}\text{Al}_1.8\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	8	2	-	2	9	-	-	5	4	1
Gibbsite	$\text{Al}(\text{OH})_3$	14	8	14	10	7	14	13	12	-	13
Gypse	$\text{Ca}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_2$	2	2	2	5	3	10	5	-	8	1
Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	6	1	1	1	-	2	2	4	4	-
Albite	$\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	1	3	2	-	4	5	15	5	-	1
Bearsite	$\text{Be}_2(\text{AsO}_4)(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_4$	-	3	15	3	-	-	-	8	-	3
Pyroxène	$(\text{Ca},\text{Na})(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al})(\text{Si},\text{Al})\text{O}$	4	3	2	-	-	6	3	-	2	1
Pyrite	$\text{FeS}_2$	1	-	-	3	-	-	-	1	-	-
clinopyroxene	$(\text{Al}, \text{Ca}, \text{Fe}, \text{Mg}, \text{Na}, \text{O}, \text{Si})$ ,	5	3	-	-	-	-	1	-	-	1
Anglésite	$\text{Pb}(\text{SO}_4)$	1	-	-	1	3	-	-	1	3	-
cérusite	$\text{PbCO}_3$	-	-	-	1	-	2	-	-	1	1
Smithsonite	$\text{ZnCO}_3$	2	2	-	2	-	-	-	-	-	-
Barite	$\text{BaSO}_4$	1	2	1	1	6	1	-	-	2	-
Potassium d'arsenic	$\text{K}_3\text{As}_{11}$	-	-	-	-	-	-	-	13	6	10
orthoclase	$\text{K}(\text{AlSi}_3)\text{O}_8$	-	3	1	-	-	-	3	-	-	-
Biotite	$\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}\text{OHF}$	-	9	5	-	-	-	2	-	-	-
Realgar	$\text{AsS}$	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-
Sinnerite	$\text{Cu}_{12}(\text{As}_3\text{S}_7)(\text{As}_5\text{S}_{11})$	-	9	-	-	-	-	-	-	-	-

<b>Arsenic Telluride Iodide</b>	As <sub>5</sub> Te <sub>7</sub> I	-	-	-	-	-	-	-	-	6	-
<b>Galène</b>	PbS	-	-	1	-	2	-	-	-	-	2
<b>Blende</b>	ZnS	-	-	1	-	-	2	-	-	-	-
<b>Chalcopyrite</b>	CuFeS <sub>2</sub>	-	-	2	2	-	-	-	-	-	-
<b>Arsenic telluride</b>	Na <sub>4</sub> As <sub>2</sub> Te <sub>4</sub>	-	-	-	4	3	-	-	-	-	-
<b>Phaunouxite</b>	Ca <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>11</sub>	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-
<b>Wurtzite</b>	ZnS	1	-	-	-	-	-	-	-	2	-
<b>Sanidine</b>	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	-	-	-	-	5	4	-	-	-	-
<b>Orthoclase</b>	K(AlSi <sub>3</sub> )O <sub>8</sub>	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-
<b>Vanadinite</b>	Pb <sub>5</sub> (VO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Cl	-	-	-	-	1	-	1	-	1	-
<b>Fluoride d'arsenic</b>	As <sub>2</sub> F <sub>12</sub> NiO <sub>12</sub> S <sub>6</sub>	-	-	-	-	-	9	-	-	-	3
<b>Allactite</b>	Mn <sub>7</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>8</sub>	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Feldspath potassique</b>	(K, Na, Ca, Ba, Al)	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-
<b>Zinc-Arsenic</b>	ZnAs <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	7	-	-	-
<b>Rubidium Al.Arsenate</b>	RbAl(As <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## **Annexe III : Résultats d'analyses statistiques**

## Contributions des variables (%) :

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
carbonates	5,618	0,440	41,157	2,825	0,163	0,332	24,013	25,176	0,002
fraction < 63	2,392	<b>26,078</b>	0,350	16,735	0,431	0,583	0,512	0,346	1,147
fraction > 63	2,090	<b>27,017</b>	0,142	15,724	0,231	1,058	0,508	2,756	2,693
Mo	2,796	<b>23,127</b>	2,476	12,419	4,167	31,347	0,148	17,509	5,971
Cu	<b>17,438</b>	0,005	12,061	2,496	22,498	5,017	30,859	5,183	4,406
As	3,962	7,316	14,109	26,884	26,471	1,235	11,286	0,018	8,686
Pb	<b>21,667</b>	2,372	0,242	5,426	4,239	16,126	7,104	3,897	38,891
Zn	<b>12,306</b>	2,335	17,883	11,099	3,993	1,766	9,307	28,402	12,549
CE	<b>15,298</b>	6,826	3,135	5,668	32,490	3,840	5,917	1,182	25,643
PH	<b>16,432</b>	4,484	8,444	0,724	5,315	38,697	10,344	15,532	0,013

Moyenne : 10,000

## Cosinus carrés des variables :

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
carbonates	0,212	0,012	<b>0,719</b>	0,033	0,001	0,001	0,015	0,009	0,000
fraction < 63	0,090	<b>0,708</b>	0,006	0,193	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
Fraction > 63	0,079	<b>0,733</b>	0,002	0,181	0,001	0,002	0,000	0,001	0,000
Mo	0,105	<b>0,628</b>	0,043	0,143	0,014	0,060	0,000	0,006	0,000
Cu	<b>0,657</b>	0,000	0,211	0,029	0,073	0,010	0,019	0,002	0,000
As	0,149	0,199	0,247	<b>0,310</b>	0,086	0,002	0,007	0,000	0,001
Pb	<b>0,816</b>	0,064	0,004	0,063	0,014	0,031	0,004	0,001	0,002
Zn	<b>0,463</b>	0,063	0,313	0,128	0,013	0,003	0,006	0,010	0,001
CE	<b>0,576</b>	0,185	0,055	0,065	0,106	0,007	0,004	0,000	0,002
PH	<b>0,619</b>	0,122	0,148	0,008	0,017	0,075	0,006	0,005	0,000

**Annexe IV** : Exemples de résultats de diffraction  
aux rayons X

