



Université Cadi Ayyad Faculté des
Sciences et Techniques Marrakech
Département des Sciences de la Terre



Laboratoire des Géorressources
Unité associée au CNRST
(URAC42)



Chaire de recherche CRDI
Gestion et Stabilisation des Rejets
Industriels et Miniers



Laboratoire de Chimie
des Matériaux
et de l'Environnement



مختبر كيمياء المواد
و البيئة

Master Sciences et Techniques
Eau et Environnement



Mémoire de Stage de Fin d'Etudes

**Contribution à l'étude de la qualité physico-chimique et
métallique des eaux de surface (Oued Moulouya/
Barrage Hassan II) au voisinage de la mine
abandonnée Zeïda (Haute Moulouya)**

Par :

Maryeme CHAOUI

Soutenu le 29 juin 2013 devant le jury :

Pr. A. Rhoujjati	FSTG -Marrakech	Encadrant
Pr. M.L. El Hachimi	CRMEF- Rabat	Co-encadrant
Pr. R. Hakkou	FSTG - Marrakech	Examinateur
Pr. A. Boularbah	FSTG - Marrakech	Examinateur

2012/2013

Remerciements

Avant d'exposer les résultats de ce travail, je tiens à remercier mes encadrants. Merci pour votre patience, votre soutien, votre gentillesse, et votre grande humanité, merci pour m'avoir supporté, dans tous les sens du terme, et merci pour ce travail d'équipe qui m'a tant apporté. Je les remercie aussi d'avoir accepté de m'accompagner dans l'une de mes missions sur le terrain et de m'avoir aidé dans le prélèvement des échantillons. J'en suis très flatté et amplement gâté de vous avoir comme encadrant.

Mr le Professeur **A.RHOJJATI**, qui m'a réservé des moments précieux de discussion et m'a facilité toutes les conditions pour mener ce travail à bien. Je le remercie infiniment pour son apport à la grande cohérence de ce manuscrit, sa disponibilité et sa sympathie.

Mr le Professeur **M.L. EL HACHIMI**, d'avoir proposé le sujet et voulu m'encadrer. Je le remercie pour tous les conseils et les encouragements qu'il m'a prodigué et pour m'avoir aidé le plus possible que ce soit durant son séjour à Rabat ou à Marrakech. Je le remercie aussi très sincèrement pour sa sympathie, ses remarques et ses discussions les plus intéressantes.

Mes remerciements vont également aux examinateurs : **Mr R. HAKOU** (du département de Chimie) et **Mr A. BOULARBAH** (du département de Biologie) qui ont aimablement voulu juger ce travail. Et d'avoir présidé ce jury de Master, malgré leurs nombreuses occupations. Leurs présences parmi nous sont liées à l'intérêt qu'ils portent à l'environnement.

Ma gratitude et mes respects à Monsieur le Professeur **A. BACHNOU** pour le temps précieux qu'il nous a consacré et de nous avoir fait part de son grand savoir.

Mes remerciements sont destinés à la chaire de recherche, au Laboratoire de Chimie des Matériaux et de l'Environnement des Sciences et Techniques, Université Cadi Ayyad, Marrakech, société REMINEX, et société ONHYM dans lesquels j'ai effectué des analyses des eaux.

Mes remerciements s'adressent également à l'étudiant **ACHRAF** pour son aide précieuse dans les analyses par l'ICP. Ainsi que, pour le temps qu'il m'a accordé pour m'aider à réaliser les analyses.

Je présente mes sincères et vifs remerciements à mes parents, que ce travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, de vos prières et le fruit de vos innombrables sacrifices.

Je remercie vivement mes biens aimés sœurs et frère, pour leur encouragement. Pour toutes les personnes dont je n'ai pas cité les noms, qu'elles soient toutes assurées de mes profondes grâces.

Je n'oublie pas dans ces remerciements tous mes amis de classe Eau et Environnement, pour leur ambiance agréable dans laquelle s'est déroulé ce travail, leur sympathie et leur soutien durant ces six mois de stage.

Résumé

Située à l'oriental du Maroc dans la Haute Moulouya, la mine de Zeïda faisait partie du plus grand gisement plombifère du Maroc. Après avoir connu l'exploitation intense du minerai de plomb de 1972 à 1985 ce centre minier est actuellement abandonnée sans réhabilitation : des haldes à résidus de traitement abandonnées sur les berges et sur le parcours de l'oued Moulouya non loin du barrage Hassan II situé à une quinzaine de kilomètres en aval, des terrils miniers et des carrières profondes abandonnés.

L'étude concerne la qualité physicochimique et métallique des eaux de surface (oued Moulouya, oued Ansegmir, Barrage Hassan II) au voisinage de la mine de Zeïda afin d'établir un diagnostic de l'état de la qualité de ces eaux, compte tenu de leur usage à des fins tant domestiques qu'agricoles.

Dans ce contexte deux campagnes d'échantillonnage ont été effectuées au niveau de dix stations, la première en saison humide (Février 2013), la deuxième en saison sèche (Juin 2013), les paramètres physicochimiques ont été mesurés et des analyses ont été réalisées au laboratoire et tout ceci pour étudier la qualité des eaux prélevées.

Les résultats de l'étude montrent des concentrations élevées en éléments majeurs (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{4-} , NO_3^- , HCO_3^-) en particuliers au niveau des stations situées au voisinage de la mine et généralement pendant la saison sèche. Au niveau du barrage Hassan II, l'augmentation des concentrations n'est pas très distinguée. Les résultats d'analyse des éléments traces métalliques dans la seule phase dissoute, nous n'ont pas permis de donner un jugement perspicace sur la pollution métallique des eaux étudiées.

Ainsi, la comparaison entre les résultats obtenus et la grille de qualité des eaux de surface que la qualité physico-chimique des eaux de l'oued Moulouya et du barrage Hassan II destinée à la consommation des populations est en général moyenne à bonne. Selon la grille de qualité des eaux destinées à la production de l'eau potable ces eaux nécessitent un traitement physique simple et la désinfection pour qu'elles soient aptes à la consommation humaine.

Mots clés : Mine abandonnée Zeïda, qualité des eaux, paramètres physico-chimique, Métaux lourds, eaux de surface (oued Moulouya/ barrage Hassan II).

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	9
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	1
I. Généralités sur la pollution des eaux	12
I.1 Définition	12
I.2 Sources de pollutions	12
I.3 Formes de pollutions :	13
I.4. Paramètres caractéristiques de la pollution :	14
II. Eléments traces métalliques (Pb, Zn, Cu, Cd) dans l'eau: sources, géochimie, comportement, normes et toxicité.....	15
II.1 Rappels généraux sur les métaux lourds.....	15
II.2 Sources des métaux lourds dans les eaux de surface	16
II.2.1 Origines naturelles	16
II.2.2 Origines anthropiques	17
II.3 Chimie et comportement des métaux lourds dans l'eau	18
II.3.1 L' Arsenic	19
II.3.2 Le plomb	21
II.3.3 Le cuivre	22
II.3.4 Le zinc	23
II.3.5 Le cadmium	24
II.4 Normes relatives aux éléments traces métalliques dans l'eau	24
II.5 Toxicité des ETM	25
II.5.1 L' Arsenic	25
II.5.2 Le Zinc.....	26
II.5.3 Le plomb	27
II.5.4 Le cadmium	28
II.5.5 Le cuivre	29
III Exploitation minière et impacts sur l'environnement.....	30
III.1 Généralités.....	30
III.2 Types d'exploitations minières.....	30
III.3 Phases et opérations d'exploitation	31
III.4 Impacts de l'exploitation minière sur l'environnement.....	31
CHAPITRE II: RESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	1

I. Situation géographique	34
II Géologie régionale.....	36
III. Climat du bassin versant de la Moulouya.....	38
III.1 Précipitations	38
III.2 Température.....	39
III.3 Vents.....	40
III.4 Evaporation	40
IV. Ressources en Eau.....	40
IV.1 Hydrologie :	41
IV.2 Aménagements hydraulique de la région: barrage Hassan II.....	43
IV.3 Hydrogéologie.....	44
V. Présentation de l'exploitation minière dans la Haute Moulouya.....	45
V.1 Minéralisations de la Haute Moulouya.....	45
V.2 Le site minier de Zeïda, historique et technique d'exploitation et état actuel des lieux :.....	46
CHAPITRE III: MATERIELS ET METHODES.....	1
I. Choix des stations d'échantillonnage.....	51
II. Protocole d'échantillonnage	52
III. Méthodes de mesures et d'analyses.....	52
III.1.2 Paramètres au laboratoire	55
III.2 Dosage des ETM	58
CHAPITRE III: Résultats et discussions	1
I. Contrôle de la cohérence des analyses	60
II. Paramètres mesurés in-situ	61
II.1 Température	61
II.2 potentiel d'hydrogène (pH).....	61
II.3 Conductivité électrique	62
II.4 Oxygène dissous	63
II. 5 Potentiel d'oxydoréduction.....	64
III. Paramètres mesurés au laboratoire	65
III.1 Matières en suspension.....	65
III.2 Les éléments majeurs	66
III.3 Eléments traces métalliques	70
IV. Faciès chimiques des eaux	71
IV.1 Diagramme de Piper.....	71

IV.2 Diagramme de Shoeller-Berkaloff	73
V. chimie des eaux au cours du temps et origine des éléments minéraux.....	75
V.1. Indices de saturation.....	76
V.2 Analyse en composante principale (ACP).....	78
VI. Qualité des eaux	83
Conclusion générale	86
ANNEXE	1

LISTE DE FIGURES

Figure 1: Classification périodique des éléments.....	16
Figure 2 : Voies de dispersion dans l'environnement des polluants provenant de résidus solides miniers.....	1
Figure 3 : Représentation schématique des processus qui déterminent les concentrations des ETM dans une colonne d'eau	19
Figure 4 : Stabilité thermodynamique de spéciation d'Arsenic inorganique dans les eaux naturelles .	20
Figure 5 : Spéciation du Pb dans les eaux naturelles.	21
Figure 6 : Champs de stabilité des minéraux de Pb	22
Figure 7 : Spéciation du Cuivre dans des eaux naturelles	23
Figure 8 : Spéciation du Zn dans les eaux naturelles	24
Figure 9 : Situation géographique de la zone d'étude	1
Figure 10 : Log stratigraphique synthétique de la Haute Moulouya et ses bordures atlasiques.....	36
Figure 11 : Schéma géologique de la Haute Moulouya.....	37
Figure 12 : Précipitations moyennes annuelles observées à la station Zeida	39
Figure 13 : Précipitations moyennes annuelles observées à la station Ansegmir	39
Figure 14 : Débits moyens annuelles en m ³ /s (1980-1996) de l'oued Moulouya à la station Zeida....	41
Figure 15 : Débits moyens annuelles en m ³ /s (1980-1999) de l'oued Ansegmir	41
Figure 16 : carte hydrologique de la Haute Moulouya.....	42
Figure 17 : Situation géographique du barrage Hassan II en Haute Moulouya	43
Figure 18 : photo du Barrage Hassan II, Haute Moulouya (Février 2013).....	44
Figure 19 : Coupe géologique montrant la position des minéralisations dans la boutonnière	1
Figure 20 : Exploitation des minéralisations de Zeïda dans les arkoses et grès rouges du Trias (tr) transgressifs sur la paléosurface horizontale du granite varisque (g)	47
Figure 21 : Production réalisée au centre minier Zeïda de 1973 à 1985	48
Figure 22 : Mine de Zeïda, état actuel de surface : a: Station de concassage ; b: Terril; c : Lac de carrière ; d : Laverie et bassin de décantation	
1	
Figure 23 : Situation des stations d'échantillonnage des eaux	1
Figure 24 : variation spatio-temporelle de la température	61
Figure 25 : variation spatio-temporelle de pH	62
Figure 26 : variation spatio-temporelle de conductivité électrique	63
Figure 27 : variation spatio-temporelle de l'oxygène dissous	64
Figure 28 : variation spatio-temporelle du potentiel d'oxydoréduction	64
Figure 29 : variation spatio-temporelle de la matière en suspension	65
Figure 30 : Variation spatiotemporelle du calcium dans les eaux (mg/l).	66
Figure 31 : Variation spatiotemporelle du magnésium dans les eaux (mg/l).	67
Figure 32 : Variation spatiotemporelle des sulfates dans les eaux (mg/l).	67
Figure 33 : Variation spatiotemporelle du sodium dans les eaux (mg/l).	68
Figure 34 : Variation spatiotemporelle du potassium dans les eaux (mg/l).	68
Figure 35 : Variation spatiotemporelle des chlorures dans les eaux (mg/l).	69
Figure 36 : Variation spatiotemporelle des nitrates dans les eaux (mg/l).	69
Figure 37 : Variation spatiotemporelle des bicarbonates dans les eaux (mg/l).	70
Figure 38: Faciès chimique de l'oued Moulouya et du barrage Hassan II (Février, 2013)	

Figure 39 : Faciès chimique de l'oued Moulouya et du barrage Hassan II (Juin, 2013)	73
Figure 40 : chimie des eaux de l'oued Moulouya et du barrage Hassan II (Février, 2013)	74
Figure 41 : chimie des eaux de l'oued Moulouya et du barrage Hassan II (Juin, 2013)	75
Figure 42 : indice de saturation des eaux de la retenue du barrage Hassan II (Février, 2013)	77
Figure 43 : indice de saturation des eaux de la retenue du barrage Hassan II	77
Figure 44 : Diagramme de composantes principales (variables, axes F1 et F2 : 59,328%)	81
Figure 45 : Diagramme des composantes principales (individus, axes F1 et F2 : 59,328% (Février, 2013)	1
Figure 46 : Diagramme de composantes principales (variables, axes F1 et F2 : 65,55%)	82
Figure 47 : Diagramme des composantes principales (individus, axes F1 et F2 : 65,55% (Juin, 2013)	83

Liste des Tableaux

Tableau 1: Rapport entre le flux lié à l'activité humaine et le flux naturel	17
Tableau 2 : Réserves aux centres miniers de la Haute Moulouya.....	45
Tableau 3 : Résultats de calcul de la balance ionique (en %) pour les échantillons	60
Tableau 4: Concentrations en ETM ($\mu\text{g/l}$) dans les eaux de surfaces au voisinage.....	71
Tableau 5 : Valeurs propres et pourcentages de contribution des deux premiers axes.....	78
Tableau 6 : Matrice de corrélation entre les variables de l'ACP (Février, 2013).....	79
Tableau 7 : Matrice de corrélation entre les variables de l'ACP (Juin, 2013).....	79

INTRODUCTION GENERALE

L'écosystème aquatique est de plus en plus menacé par différentes sources de pollution, qui risquent de diminuer ses potentialités économiques et d'avoir des répercussions néfastes sur la santé humaine. La lutte contre la pollution des eaux est au centre des discussions et des débats à l'échelle mondiale. Des centaines de titres consacrés à ce sujet ont pu être relevés dans la presse, des centaines de colloques, rencontres, et congrès pour en débattre à ces problèmes, sans oublier les campagnes de sensibilisation sur les graves problèmes de pollution subis par les différents écosystèmes.

Le Maroc compte parmi les pays d'Afrique les plus menacés par la déficience des ressources en eau suite à la sécheresse qui frappe de plus en plus durement de nombreuses régions du pays. A ceci s'ajoute la régression des réserves hydriques potables due à la dégradation de la qualité suite aux différentes formes de pollution dont les sources sont diverses. Parmi ces dernières, on cite l'industrie minière.

L'exploitation minière porte généralement préjudice à l'environnement, elle induit inévitablement la dégradation de l'écosphère. Les mines abandonnées sans réhabilitation constituent assurément pour leur part des sources de contamination et de nuisance pour l'environnement. Les opérations d'extraction et de broyage minier, la concentration de minerais et l'évacuation de rejets miniers, constituent des sources évidentes de contamination de l'environnement (EL Hachimi, 2013).

Selon Lee (2001), l'exploitation minière est l'une des plus importantes sources de métaux lourds dans l'environnement. Des niveaux élevés de métaux lourds peuvent être rencontrés aux alentours et dans les mines métallifères, dus à la décharge et à la dispersion des résidus miniers dans les sols agricoles proches, les récoltes et les cours d'eau. C'est ce qui pose éventuellement un risque potentiel pour les habitants des régions minières.

Le centre minier Zeïda, situé à l'oriental du Maroc dans la Haute Moulouya, ayant connu l'exploitation intense du minerai de plomb de 1972 à 1985 est actuellement abandonné sans réhabilitation. Situé sur les berges de l'oued Moulouya et non réhabilité, ce site minier pourrait porter atteinte à l'environnement. En effet, l'esthétique du milieu est dégradé : des stocks de résidus miniers non végétalisés, des carrières profondes, du matériel et des ateliers abandonnés. Ce site pourrait donc constituer un risque pour l'environnement en particulier pour les ressources en eau de surface de la Haute Moulouya (Oued Moulouya,

Oued Ansegmir, Barrage Hassan II) de la région et pour la santé des riverains qui utilisent ces eaux sans traitement préalable.

Des études antérieures se sont intéressées à l'impact général des mines abandonnées dans la Haute Moulouya sur l'environnement (El Founti (2000) ; Ech-Chokri (2000) ; Assi (2001) ; Saidi et al (2002) ; Bouabdli et al (2004) ; El Hachimi et al (2005) ; El Hachimi (2006), EL Hachimi (2013), dans notre cas, il s'agit par la présente d'une contribution à l'étude de la qualité physicochimique et métallique des eaux de surface (oued Moulouya, oued Ansegmir, Barrage Hassan II) au voisinage de la mine de Zeïda dans la Haute Moulouya. Il s'agit d'une étude ciblée pour discuter l'état des ressources en eaux au voisinage de la mine de Zeïda particulièrement celles du barrage Hassan II récemment édifié dans la région.

Dans ce contexte deux campagnes d'échantillonnage ont été effectuées, la première en saison humide (Février 2013), la deuxième en saison sèche (Juin 2013), des échantillons d'eau ont été prélevés, des paramètres physicochimiques ont été mesurés et des analyses ont été réalisées au laboratoire, tout ceci afin de discuter la qualité physicochimique des eaux prélevées.

La présente étude est organisée en quatre parties :

- présentation du contexte scientifique général de l'étude centré sur les différentes sources et formes de la pollution des eaux, notamment les éléments traces métalliques et les différents comportements de ces éléments dans le milieu aquatique.
- présentation de la zone d'étude ainsi que l'exploitation minière dans la Haute Moulouya.
- présentation du matériel et des méthodes d'échantillonnage et d'analyses réalisées sur le terrain et au laboratoire.
- présentation et discussion des résultats. La qualité physicochimique des eaux est discutée par comparaison avec des références et des normes et avec des données d'autres études.



CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I. Généralités sur la pollution des eaux

I.1 Définition

Le terme **polluant** : signifie un agent physique, chimique ou biologique qui provoque une gêne ou une nuisance dans le milieu naturel. Au sens large, il désigne des agents qui sont à l'origine d'une altération de la qualité du milieu, même s'ils y sont présents à des niveaux inférieurs au seuil de nocivité.

Selon la Directive Européenne 2000/60/CE du 23 octobre 2000, la **pollution** désigne une dégradation de l'environnement liée généralement à l'activité humaine par l'introduction directe ou indirecte des substances exogènes de nature chimiques, physiques ou biologiques. Ces derniers sont potentiellement toxiques pour les organismes vivants, et perturbent de manière plus ou moins importante le fonctionnement naturel des écosystèmes.

On peut donc définir la pollution comme étant un sous-produit de l'activité humaine, qui peut toucher l'atmosphère, le sol ou l'eau. Elle peut affecter la santé humaine, l'eau de consommation, l'eau de baignade, la production agricole, les espèces animales ou végétales, la beauté des paysages, etc.

Dans le cadre de cette étude, on s'intéresse à la pollution des eaux superficielles (rivières, plan d'eau). En effet, l'introduction des polluants dans l'eau a pour conséquence:

- La détérioration de la qualité des eaux au point de la rendre impropre à la consommation humaine ;
- L'altération des capacités physiologiques des êtres vivants (faune et flore) ;
- L'augmentation de la mortalité de certaines espèces animales ou végétales.

Le milieu aquatique est naturellement capable de transformer et d'éliminer en partie ou en totalité les substances (biodégradable) qu'il reçoit, et d'assurer ainsi le maintien de son équilibre et de sa qualité. Cependant, ce processus naturel prend du temps et devient très difficile lorsqu'il y a une quantité importante de polluants qui sont ajoutés à l'eau.

I.2 Sources de pollutions

Les rejets des activités domestiques, urbaines, agricoles et industrielles constituent la principale source de pollution des eaux de surface et souterraine. Le vecteur de transport et de dissémination idéale de ces rejets est l'eau. On peut classer donc les différentes sources de pollution en trois grandes catégories: la pollution domestique et urbaine, pollution agricole et

pollution industrielle. Les sources naturelles peuvent également contaminer le milieu aquatique dans certains cas.

- **Pollution d'origine domestique et urbaine :**

Elle englobe les rejets liquides (eau usées domestiques et urbaines), et les rejets solides des décharges publiques, qui sont en majorité sauvages et non contrôlées.

En effet, les décharges contiennent des matières organiques biodégradables, qui en présence des eaux météoriques, subissent un lessivage vers les eaux superficielles, où elles s'infiltreront vers les nappes phréatiques. Pour les eaux usées qu'elles soient urbaines, domestiques ou des rejets industriels, elles sont directement évacuées dans les oueds sans aucun traitement préalable.

- **Pollution d'origine agricole :**

La pollution liée à l'agriculture est causée par l'utilisation anarchique d'engrais, de pesticides et d'herbicides ou de fongicides. Les méthodes modernes exigent parfois des labourages profonds et violents, ce qui favorise l'infiltration directe des polluants (NO_3 , NO_2 , SO_4 , PO_4 et Cl) vers la nappe phréatique.

- **Pollution d'origine industrielle :**

C'est la plus importante pollution, générée principalement par les industries minières au niveau des différentes étapes du traitement des minerais métalliques. Ces derniers libèrent une grande variété de substances métalliques, qui contribuent de façon cruciale à la mise en circulation des ETM et à leur distribution dans les sols, les sédiments, les nappes d'eaux et les végétaux.

- **Pollution naturelle :**

Ce type de pollution affecte rarement les ressources en eau, il s'agit de l'éruption volcanique, des épanchements sous-marins d'hydrocarbures ou encore lorsque l'eau entre en contact avec des gisements minéraux, en déclenchant des réactions de dissolution ou d'érosion, entraînant la libération de concentrations inhabituelles en métaux lourds.

I.3 Formes de pollutions :

Selon l'origine et la manière avec lequel les polluants sont transportés vers les milieux aquatiques on distingue :

- **Pollution ponctuelle** : souvent liée à des sources bien identifiées (rejets domestiques ou industriels...). Ce type de pollution peut être éliminé par traitement dans des stations d'épurations,
- **Pollution diffuse** : due aux épandages des pesticides et des engrais sur les terres agricoles, elle concerne l'ensemble d'un bassin versant en mettant plus de temps pour atteindre les milieux aquatiques, et ne peut être traitée qu'à la source en diminuant l'usage de substances responsables,
- **Pollution permanente** : ce type de pollution est la plus répandue, il s'agit des rejets domestiques de grande agglomération,
- **Pollution périodique** : celle qui apparaît périodiquement suite à l'augmentation des rejets lié au tourisme et aux crues,
- **Pollution accidentelle ou aigue**: liée au déversement intempestif de produits toxiques d'origine industrielle, agricole, ou de lessivage des sols urbains.

I.4. Paramètres caractéristiques de la pollution :

Ce sont les caractéristiques physico-chimiques et les éléments métalliques, utilisé le plus souvent pour porter un jugement sur la qualité de l'eau. Certains paramètres sont mesurés *in situ*, comme la description générale de l'eau (couleur, turbidité), la teneur en oxygène dissous et la température. Au laboratoire, les analyses renseignent sur le taux d'éléments azotés et phosphatés (nitrates, phosphates), les matières solides en suspension, et différentes substances dissoutes apportés par les rejets polluants. Ainsi, les caractéristiques physiques peuvent avoir un effet sur d'autres caractéristiques organoleptiques ou peuvent être associées à celles-ci.

Les métaux lourds et des substances comme le cyanure, risquent d'être dangereux dans l'eau potable. Il est ainsi important de prévenir leurs introduction dans l'eau potable parce qu'il est parfois difficile d'éviter de les absorber en respirant l'air ou en ingérant du lait et de la nourriture. En général, ces substances contenues dans l'eau ont des effets néfastes sur l'Homme.

II. Eléments traces métalliques (Pb, Zn, Cu, Cd) dans l'eau: sources, géochimie, comportement, normes et toxicité

II.1 Rappels généraux sur les métaux lourds

Un métal est un élément chimique faisant partie de la composition de l'écorce terrestre. On le rencontre généralement sous forme de minerais, associés entre eux sous forme d'alliages ayant des propriétés métalliques : éclat métallique, bonne conductivité thermique et électrique (Aries, 2003). C'est en raison de ces caractéristiques que les métaux en fait l'objet de plusieurs utilisations tel que (les nouvelles technologies métallurgique et électroniques).

Un métal lourd désigne un élément de la table périodique (Fig.1) ayant un poids atomique élevé, et un poids spécifique supérieur à 5 g/cm^3 (Minear et Keith, 1982).

L'appellation en élément trace métallique (ETM) est liée à leur présence en faible quantité dans la croûte terrestre. Néanmoins, des facteurs anthropiques comme l'activité minière peuvent produire une augmentation considérable des concentrations en métaux dans les eaux et les sédiments de la région affectée. En outre, les éléments traces métalliques comprennent non seulement les métaux présents à l'état de trace (cadmium, cuivre, mercure, plomb, etc.), mais aussi des éléments non-métalliques, comme l'arsenic (métalloïde), et des métaux toxiques qui ne sont pas lourds (par exemple le Zinc). Ce terme ETM est plus préférable chez les scientifiques que l'appellation métaux lourds (Miquel, 2001).

On distingue ainsi:

- **Des éléments traces essentiels:** ce sont les oligo-éléments nécessaires à la vie, mais en faible dose. Ils peuvent cependant se révéler très nocifs en quantités trop importantes. C'est le cas du fer (Fe), cuivre (Cu), zinc (Zn), cobalt (Co), manganèse (Mn), chrome (Cr), nickel (Ni), Vanadium (V), Titane (Ti), Arsenic (As).
- **Des éléments traces non essentiels:** Ils ne sont pas nécessaires à la vie, ils sont toxiques même en faible quantité, comme le plomb (Pb), le cadmium (Cd) et l'antimoine (Sb) (Chiffolleau et *al.* 2001). Les métaux lourds s'accumulent dans les organismes vivants et engendrent des effets toxiques à court et long terme. Certains, comme le cadmium, le chrome et le plomb, sont cancérigènes.

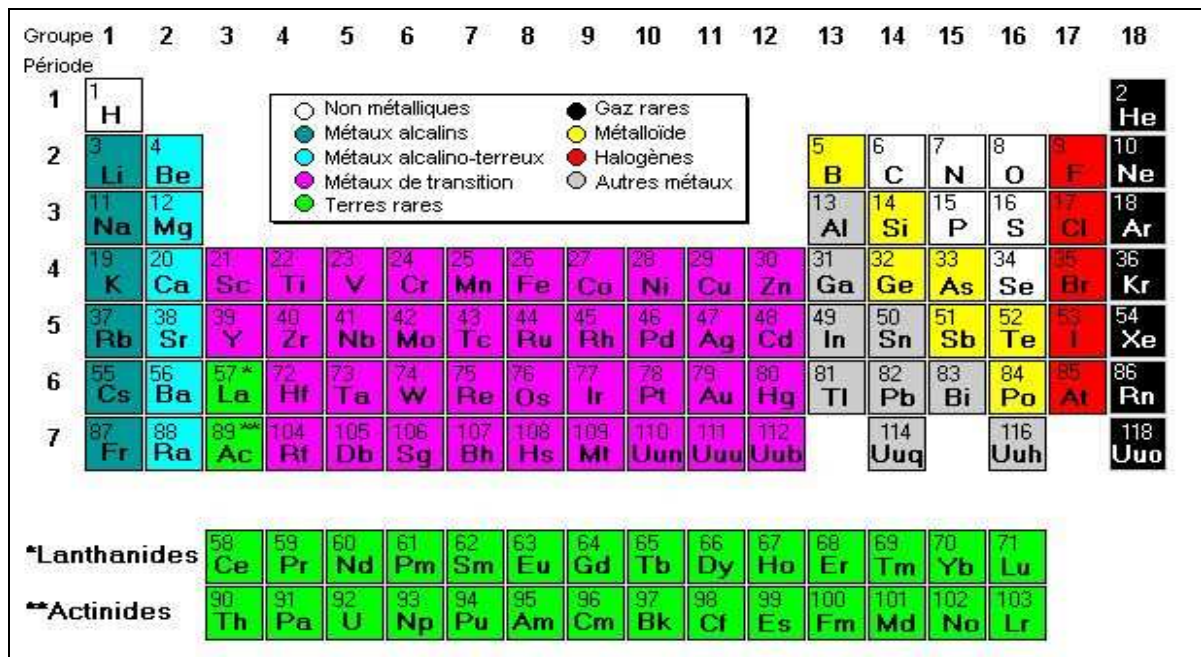


Figure 1: Classification périodique des éléments

II.2 Sources des métaux lourds dans les eaux de surface

Une quantité importante de métaux lourds est introduite dans l'environnement, issue de sources naturelle et anthropique, on distingue :

II.2.1 Origines naturelles

Les métaux sont naturellement présents dans tous les compartiments de l'environnement, mais en quantité très faibles (en traces) sans constituer un danger pour l'environnement. Cependant, l'érosion de l'écorce terrestre amène des concentrations non négligeables des éléments métalliques vers les cours d'eau. Les roches du bassin versant sont soumises d'une part, à l'altération et désagrégation par l'action mécanique (agents météoriques), et d'autre part par l'action chimique via les attaques par des acides formés dans l'atmosphère (pluies acides).

En effet, les métaux fixés dans les roches sous forme d'oxydes ou de silicates sont peu altérables chimiquement et peuvent être libérés de la roche par érosion et transportés sous forme de particules. Par contre, les métaux présents dans les roches sous forme de sulfures et de carbonates sont facilement attaqués chimiquement et très dissous dans l'eau. D'autres sources naturelles sont à l'origine de la dispersion des métaux dans l'environnement:

volcanisme, érosion et transport éoliens de poussières, feux de forêts, certaines eaux souterraines, en particulier dans les régions volcaniques ou les nappes profondes, sont très riches en métaux.

II.2.2 Origines anthropiques

Outres les phénomènes naturels, l'activité humaine, même si elle ne crée pas de métaux lourds, participe à leur diffusion dans l'environnement à partir :

- des effluents industriels ;
- des industries d'extractions minières ;
- des rejets associés à la mise en décharge ou à l'incinération des produits arrivés en fin de vie ;
- du lessivage des sols agricoles contenant des produits phytosanitaires à base de cuivre et d'arsenic.

Néanmoins, l'industrie et l'activité minière restent toujours responsables de la majorité des rejets directs des métaux lourds dans l'eau. Selon Sigg (2000), l'industrialisation et les activités humaines sont à l'origine de l'accélération des cycles biogéochimiques de nombreux éléments traces métalliques.

Ainsi, le flux anthropogénique de différents éléments traces vers les milieux naturels dépasse le flux naturel (Tab.1). En effet, le cadmium, l'arsenic, et surtout le mercure et le plomb sont introduits dans l'environnement, de façon quasi exclusive par l'homme.

Tableau 1: Rapport entre le flux lié à l'activité humaine et le flux naturel (Lantzy et Mackenzie,)

Elément	Flux lié à l'homme / Flux naturel (%)
Chrome	161
Cadmium	1 897
Arsenic	2 786
Mercure	27 500
Plomb	34 583

Dans les conditions environnementales, la concentration en ETM dans la phase aqueuse est comparativement bien faible (peu soluble dans l'eau) par rapport à la phase solide à

laquelle ils sont majoritairement associés. En effet, dans un site minier, les métaux provenant du traitement du minerai atteignent divers compartiments de l'environnement par les différentes voies de dispersion (Fig. 2).

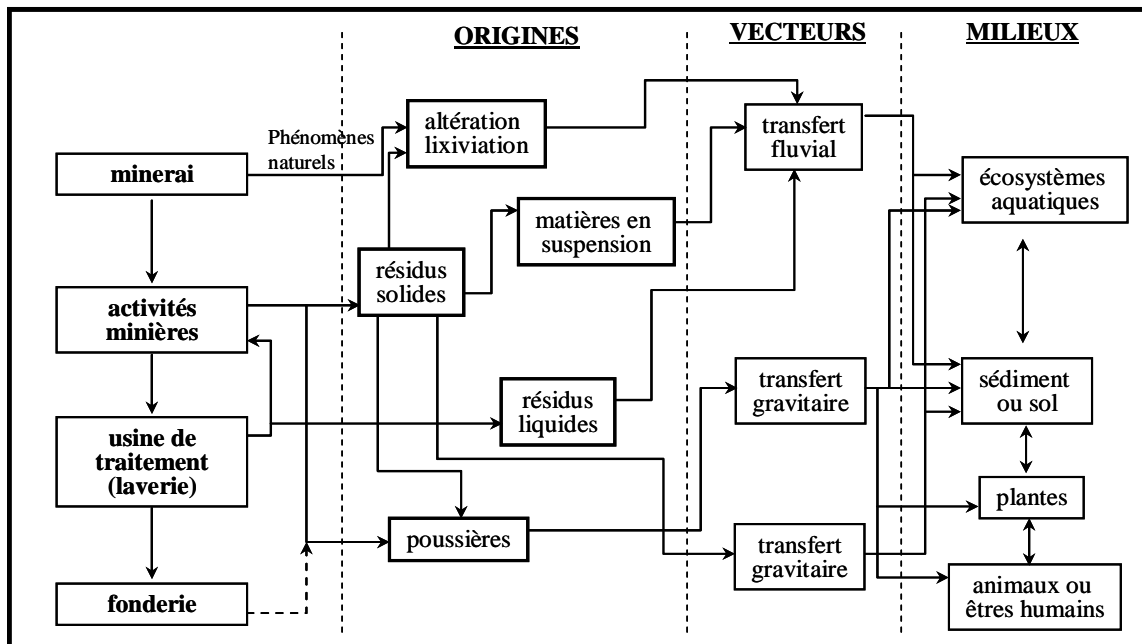


Figure 2 : Voies de dispersion dans l'environnement des polluants provenant de résidus solides miniers (BRGM, 1999).

II.3 Chimie et comportement des métaux lourds dans l'eau

Les ETM peuvent exister dans les milieux aquatiques sous différentes formes : ions en solution dans la phase dissoute, sous forme particulaire adsorbés à la matière en suspension ou accumulés dans les sédiments (Fig. 3).

L'étude des métaux dans la phase particulaire est nécessaire car cette dernière joue un rôle important dans le cycle biogéochimique des métaux dans le milieu aquatique. En effet, la phase particulaire permet de transporter, de stocker et de recycler les ETM de façon significative à travers les matières en suspension et les sédiments.

En fonction des paramètres physico-chimique du milieu : le pH, l'oxygène, la salinité, la dureté et la teneur en carbone organique les métaux peuvent être transférés de la phase particulaire vers la phase liquide (Burgess and Scott, 1992). Par exemple, lors d'une diminution du pH dans l'eau, la concentration des métaux sous forme ionique augmente du fait de la compétition avec un nombre croissant d'ions hydroniums (H_3O^+ , n H_2O) vis-à-vis des sites d'adsorption.

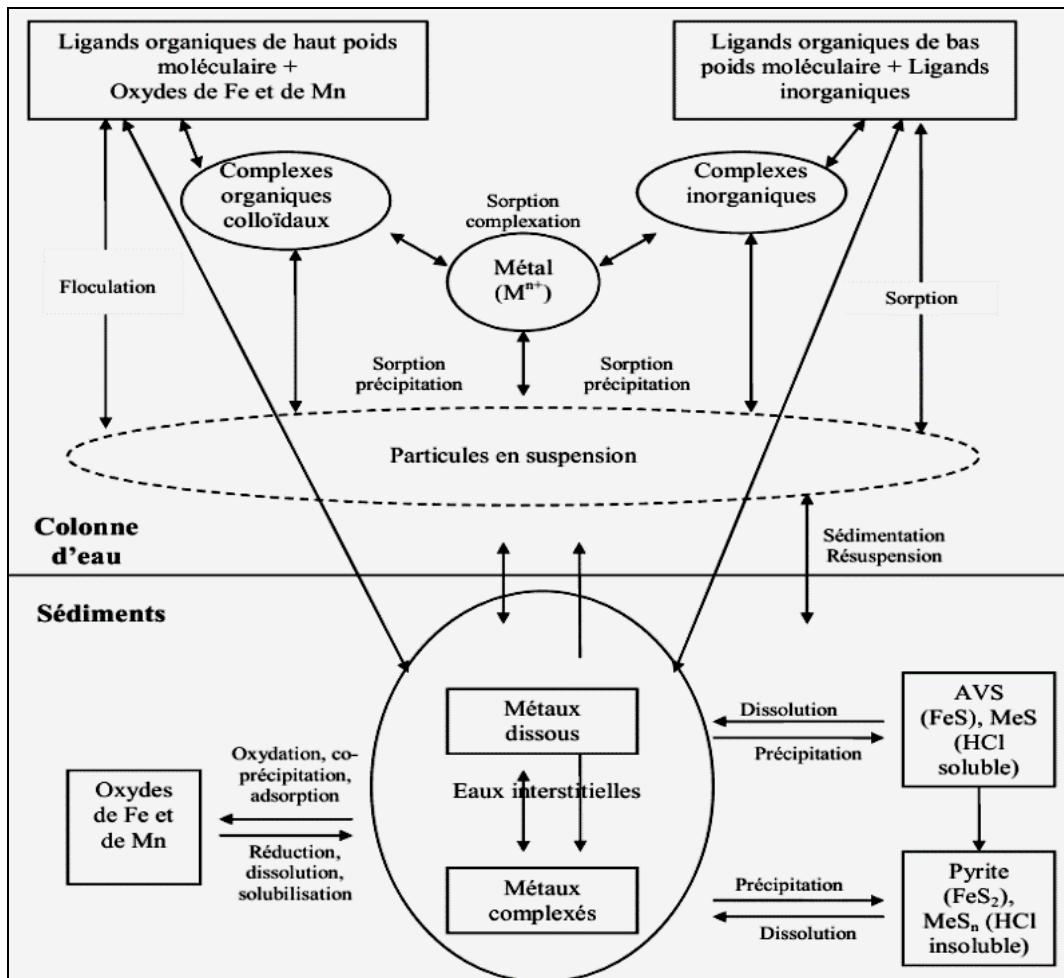


Figure 3 : Représentation schématique des processus qui déterminent les concentrations des ETM dans une colonne d'eau (Audry, 2003 et Burdige, 2006)

La matière organique joue aussi un rôle très important vis-à-vis de la mobilité des métaux. Sa présence (dissoute ou particulaire) déclenche diverses réactions de complexations. Les concentrations en métal libre (considérées comme étant les plus assimilables par les organismes aquatiques) diminuent alors, entraînant par la même occasion une diminution de la biodisponibilité métallique (Fairbrother et al. 2007).

En fait, si le milieu aquatique est riche en matière en suspension, les concentrations totales élevées en métaux se trouvent fixées sur les particules, mais les concentrations en solution restent alors faibles (Sigg et al, 2000).

II.3.1 L'Arsenic

L'arsenic est un métalloïde qui existe sous différentes formes de composés inorganiques et organiques. Il apparaît dans l'environnement sous 5 états d'oxydation (5+, 3+, 0, 1- et 2-), parmi lesquels les formes oxydées (As^{3+} et As^{5+}) sont relativement plus toxiques

que les autres (Brown et al., 1999). La forme d'arséniates (V) est plus répandue dans les eaux de surface, alors que les arsénites (III) sont concentrés dans les eaux souterraines, (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2000). Ces variations de formes inorganiques d'arsenic sont liées au pH et aux conditions d'oxydoréduction du milieu (United States Environmental Protection Agency, 2000b). Les deux composés d'arsenic organique les plus souvent rencontrés dans l'environnement sont l'acide monométhylarsénique (AMMA) et l'acide diméthylarsénique (ADMA).

De point de vue géochimique, l'arsenic peut exister sous différents degrés d'oxydations dans les eaux et les sols. Dans l'eau, la forme pentavalente (AsO_4^{4-} , HAsO_4^{3-} , $\text{H}_2\text{AsO}_4^{2-}$, H_3AsO_4 selon le pH) est la forme prédominante en conditions très oxydantes (Fig. 4). Lorsque les conditions sont moins oxydantes, la forme majoritaire est la trivalente nettement plus toxique (AsO_3^{3-} , HAsO_3^{2-} , H_2AsO_3 , H_3AsO_3 selon le pH). Dans les conditions réductrices, l'arsenic existe sous forme des arséniures stables. Au niveau du sol, l'arsenic existe principalement sous forme trivalent, arsénite As (III) ou pentavalent, arséniate As (V). Les formes trivalentes et pentavalentes sont solubles, et peuvent atteindre des fortes concentrations sans être affectées par des processus de précipitation de minéraux. 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.

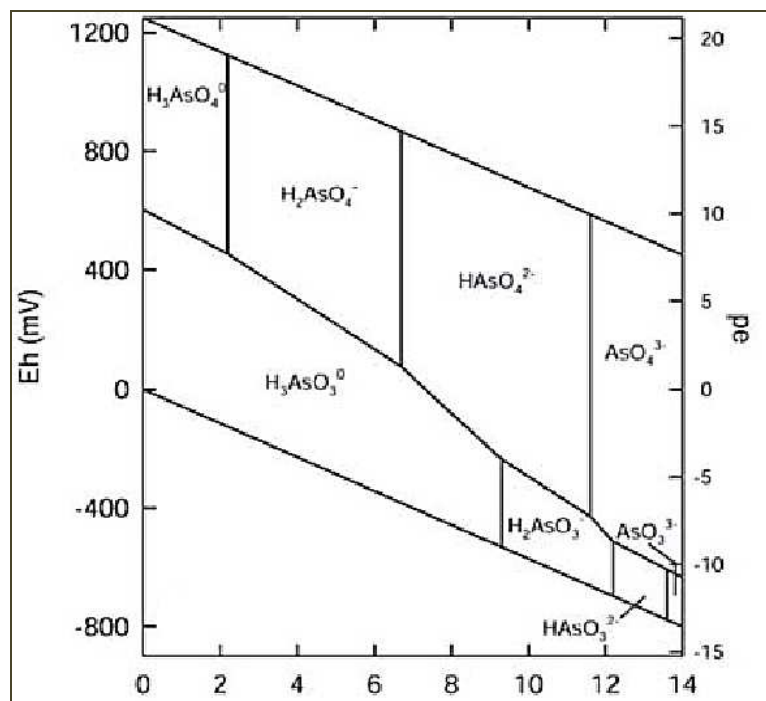


Figure 4 : Stabilité thermodynamique de spéciation d'Arsenic inorganique dans les eaux naturelles (Smedley et Kinniburgh, 2002 ; Craw et al., 2003)

II.3.2 Le plomb

Le plomb (Pb) présente un poids atomique de 207,2 et une densité égale à 11,3. C'est le 36^{ème} élément de la croûte terrestre en termes d'abondance (Greenwood et Earnshaw, 1984 *in* N'guessan, 2008). Il existe dans la nature sous forme de carbonates (cérusite), de phosphates (pyrophosphate), mais surtout de sulfure (galène). Dans le système aquatique, le plomb existe sous trois formes essentielles : le plomb dissous, colloïdale et le plomb particulaire, avec 1/6 seulement sous forme dissoute, le reste est associé aux matières en suspension. De ce fait, la majorité du plomb transporté par les eaux de surface se trouve dans les sédiments (Rodier et al. 1996). Toutefois, la fraction adsorbée sur les particules en suspension augmente avec le pH (Cossa et al., 1993).

Ce métal est lentement dissous par l'acide chlorhydrique, beaucoup plus rapidement par l'acide nitrique et est solubilisé par les acides organiques (acide acétique, aliments acides et par l'eau contenant du citrate et des sels d'ammonium).

Toutefois, dans les eaux à pH faiblement acide, le Pb sera associé aux sulfates (PbSO_4^4), alors que pour des pH élevés (plus de 8 unités), il se trouvera sous forme de complexe avec des hydroxydes (Fig. 5). Enfin, le plomb présente une affinité avec les matières organiques, notamment de poids moléculaire moyen, pour former des complexes organométalliques qui peuvent présenter une grande toxicité et faciliter leur mobilité.

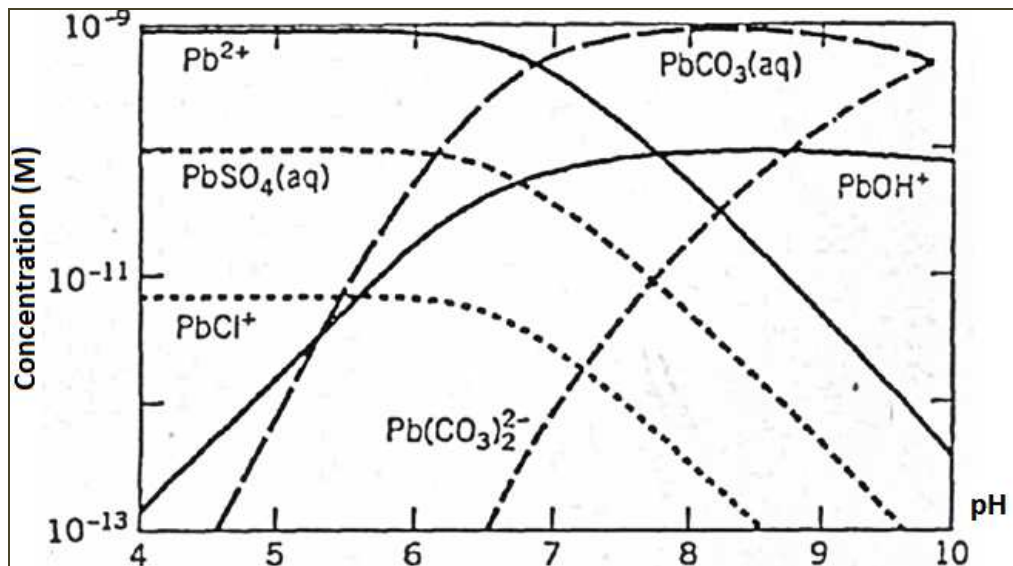


Figure 5 : Spéciation du Pb dans les eaux naturelles (Stumm et Morgan, 1996).

Du côté géochimique, selon le pH et le Eh, le Pb peut subir différents mécanismes qui contrôlent sa solubilité dans l'eau. Le Pb se présente sous deux états d'oxydation 2^+ et 4^+ . L'état tétravalent est un très fort oxydant, mais il n'est pas fréquent dans l'environnement. En revanche, l'état divalent est le plus stable dans l'environnement (Callender, 2003). En milieu réducteur, sa solubilité est limitée par la précipitation du sulfure de plomb (la galène). Par contre, dans les conditions oxydantes, le plomb est nettement plus soluble et précipite sous forme de sulfate de plomb (anglésite) ou de carbonate de plomb (cérusite) en milieu carbonaté (Fig. 6).

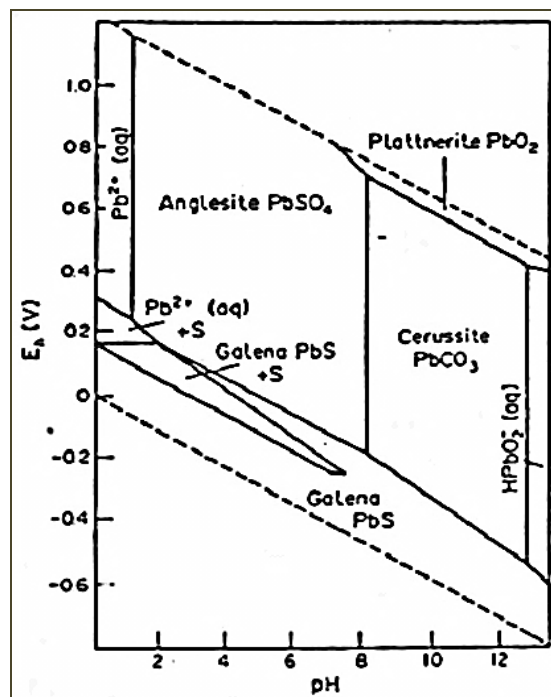


Figure 6 : Champs de stabilité des minéraux de Pb (Fergusson, 1990)

II.3.3 Le cuivre

Le cuivre (Cu) est moyennement abondant dans la croûte terrestre pour être un métal lourd (Wedepohl, 1995). On le rencontre souvent dans des sulfures ou de sulfosel (Hurlbut et Klein, 1982). Il se présente dans le système aquatique sous différentes formes chimiques : les ions libres, les formes hydratées, les sels inorganiques et les cuivre organiquement liés (Jones et Bolam, 2007). Leur devenir dépend des paramètres du milieu, tels que le pH, l'oxydoréduction, la capacité d'échange cationique (CEC), la matière organique, la quantité d'oxyde-hydroxyde de fer et d'aluminosilicates. D'après Millero (1975), les modèles chimiques pour les eaux naturelles montrent que le Cu reste à l'état d'ion 2^+ jusqu'à un pH de 6. Pour la plupart des eaux neutres, $\text{Cu}(\text{CO}_3)_2^-$ et CuCO_3 sont également importants, le second

est plus important entre pH 7 et 8 (Fig. 7). Ensuite, à pH au-dessus de 8 le complexe de dihydroxide de cuivre (2^+) prédomine. Or, l'ion Cu^{2+} libre est plus réactif que les formes complexées, sa biodisponibilité est donc plus importante (Sunda et Hanson, 1987). En effet, la matière organique naturelle, telle les acides fulviques et humiques, sont de forts agents complexant qui affectent la concentration en cuivre biodisponible (Allen et Hansen, 1996 ; Kim et al., 1999).

De manière générale, le cuivre est reconnu comme peu mobile dans la nature sauf dans des conditions extrêmes d'acidité (Baize, 1997). La solubilité du cuivre est effective à pH avoisinant 5,5 (Martinez et Motto, 2000).

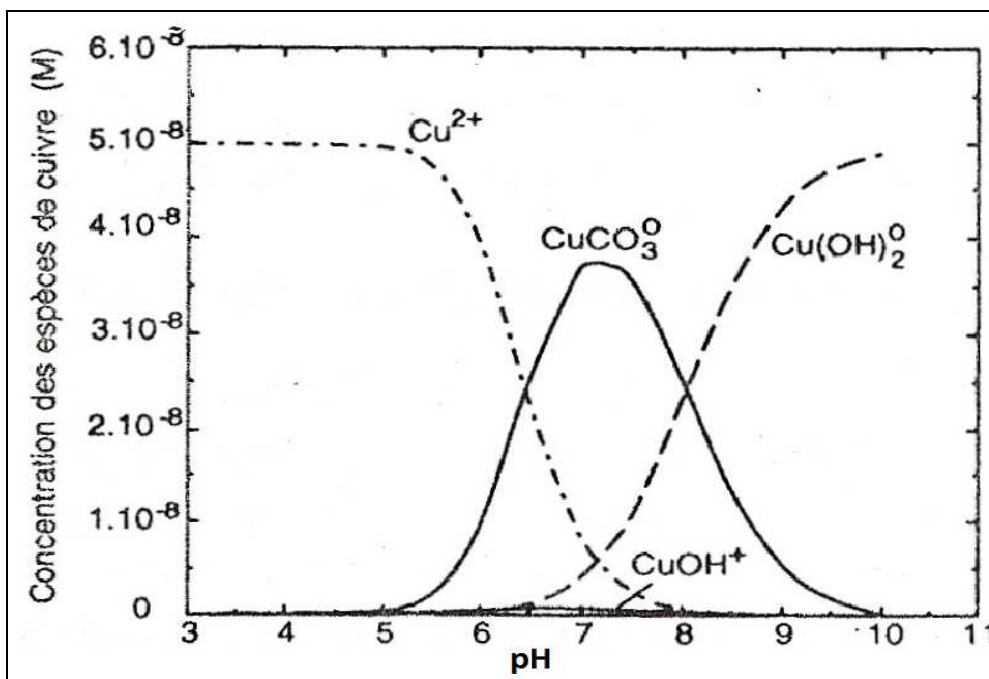


Figure 7 : Spéciation du Cuivre dans des eaux naturelles d'après Sigg et al (2000).

II.3.4 Le zinc

Le zinc est un élément chimique de symbole Zn et de numéro atomique 30 (Mahan, 1987). Cet élément se trouve dans la nature uniquement sous le degré d'oxydation (+II) (appelé ion zincique). Le cation libre Zn^{2+} prévaut dans les eaux de surface pour les conditions environnementales de pH au-dessous 8 (Fig.8). Tandis que l'espèce neutre $ZnCO_3$ (smithsonite) est abondant dans les eaux à pH supérieur à 8 (Hem, 1972 ; Stumm et Morgan, 1996). En outre, quand les eaux sont acides, le Zn va être complexé avec les sulfates (SO_4^{2-}). Si les conditions environnementales sont extrêmes en acidité ou en évapotranspiration, elles peuvent provoquer la précipitation de sels sulfatés (Nordstrom et Alpers, 1999 ; Jambor et al., 2000 ; Swedlund et Webster, 2001 ; Callender, 2003 ; Hammarstrom et al., 2005).

Ainsi, la géochimie du zinc est relativement peu complexe et l'on note un comportement chalcophile assez marqué par une association fréquente avec le soufre (Mahan, 1987).

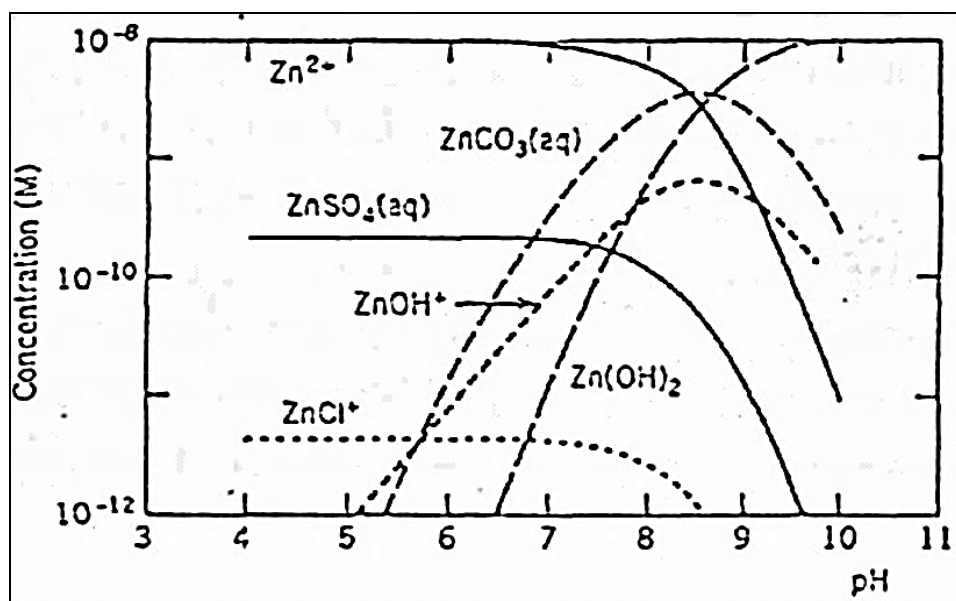


Figure 8 : Spéciation du Zn dans les eaux naturelles selon Stumm et Morgan (1996).

II.3.5 Le cadmium

Selon Gonzalez et al. (1999), le cadmium est un élément non conservatif que l'on rencontre en milieu aquatique sous diverses formes physiques (dissoute, colloïdale et particulaire) et chimiques (minérale ou organique). Un ensemble de variables physico-chimiques du milieu (salinité, pH...) régissent les transformations du cadmium dans l'environnement (Gonzalez et al., 2009 in Pierre, 2011).

Dans les eaux naturelles, l'ion Cd²⁺ prédomine en dessous de pH 8, CdCO₃ est prédominant entre les pH 8 et 10 (Hem, 1972 in Aranguren, 2008). La phase dissoute est le plus souvent rencontrée dans l'eau, tandis que la phase particulaire (Cd adsorbé à la fraction solide) est abandonnée dans les rivières très riches en matières en suspension ou des eaux proches du fond des rivières (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).

II.4 Normes relatives aux éléments traces métalliques dans l'eau

Les normes de qualité de l'eau sont élaborées par des autorités nationales et internationales des pays et les organisations internationales, suite à l'augmentation excessive de divers

polluants dans l'eau, tels que les éléments traces métalliques. L'eau d'alimentation humaine ne doit contenir en quantités dangereuses ni micro-organismes, ni substances chimiques nocifs pour la santé. Au Maroc, l'eau d'alimentation humaine doit répondre aux exigences de qualité réglementées par les décrets suivants :

- Décret n° 2-97-787 du 4 février 1998 relatif aux normes de qualité des eaux,
- Arrêtés du 17 octobre 2002 : n°1275-01 (grille de qualité des eaux de surface), n°1276-01 (normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation) ; n° 1277-01 (normes de qualité des eaux superficielles utilisées pour la production de l'eau potable).

Selon les grilles de qualité données dans la réglementation (voir annexes), la qualité des eaux peut être subdivisée en 5 classes allant d'excellente (classe 1) à très mauvaise (classe 5). L'appréciation de la qualité de l'eau, la grille se base essentiellement sur les paramètres suivants: paramètres organoleptiques, physico-chimiques, substances indésirables, toxiques, bactériologiques et biologiques.

L'élaboration des normes marocaines est inspirée de celles de la Communauté Economique Européenne (C.E.E), des normes américaines très rigoureuses ainsi que des recommandations de l'organisation mondiale de la santé (O.M.S.).

Pour les ETM, des niveaux guides et des concentrations maximales admissibles recommandées ainsi que des valeurs limites de concentrations ont été établies selon la norme et l'usage de l'eau (eau de surface, eau superficielle destinée à la production de l'eau potable, eau destinée à l'irrigation (cf. annexe)

II.5 Toxicité des ETM

II.5.1 L'Arsenic

L'arsenic est considéré parmi les éléments les plus toxiques que l'on puisse trouver. Une exposition à des faibles concentrations d'arsenic durant une longue période a des effets sur la santé humaine à différents niveaux : la peau, les muqueuses, le système nerveux, le foie, les reins et le système vasculaire (IBGE, 2002). L'arsenic peut s'accumuler dans les ongles et les cheveux avec une concentration plus élevée lors d'un contact d'une eau contaminée. Par contre, il ne peut pas s'infiltrer dans l'organisme par absorption à travers la peau lors de baignade. Les composés inorganiques arséniate sous forme d'association de l'arsenic avec l'oxygène, le chlore ou le soufre sont absorbés plus rapidement et réputés plus nocives que les

composés organiques où l'arsenic est assemblé avec du carbone ou de l'hydrogène (Wilson et al., 1993).

Les indices d'une intoxication aiguë suite à une ingestion massive d'arsenic (180 mg) sont la fièvre, l'anorexie, des vomissements et des diarrhées, et des arythmies cardiaques. D'après United States Environmental Protection Agency (2001) et National Research Council (1999) *in* INSPQ, 2002) l'intoxication par l'arsenic entraîne également une irritation importante des voies digestives, des troubles neurologiques sévères, et enfin une atteinte hépatique et rénale.

Les signes d'intoxication chronique de l'arsenic à travers une eau de consommation apparaissent à partir de 5 à 15 ans après l'ingestion des doses de plus de 700µg/j (équivalant à une consommation de 1,5 l d'eau contenant plus de 400 µg/l). Ils se manifestent par des lésions cutanées, notamment l'hyperpigmentation, les verrues et l'hyperkératose des paumes des mains et des plantes des pieds. Des neuropathies périphériques, des atteintes cardiovasculaires et vasculaires périphériques ont également été associées à une exposition prolongée à l'arsenic inorganique présent dans l'eau (National Research Council, 2001; National Research Council, 1999; Santé Canada, 2006a).

L'arsenic est surtout un élément cancérigène entraînant des cancers de la peau et des cancers anatomiques en particulier chez les ouvriers qui travaillent dans des usines de fabrication des pesticides à base d'arsenic.

II.5.2 Le Zinc

Le zinc est présent naturellement dans l'air, l'eau et le sol et il est essentiel pour la santé de l'homme, il agit comme constituant structural de nombreuses enzymes qui intervenant au niveau du métabolisme énergétique et lors de la transcription et de la traduction enzymatiques (Kabata-Pendias et Pendias, 1992). Une carence en Zinc survient le plus souvent quand sa consommation est insuffisante ou qu'il est mal assimilé. Ainsi des signes apparaissent tels que la perte de l'appétit, la diminution des sensations de goût et d'odeur, la cicatrisation lente de blessures et l'apparition de plaies. (<http://tox.etm.free.fr/zinc.html>)

Le Zinc peut être présent en quantités beaucoup plus important dans les eaux suite à un déversement des rejets issus des activités minières ou industriels. Lors d'une consommation de ces eaux contaminées, des quantités excessives par rapport aux besoins nutritionnels en zinc se concentrent dans le corps et provoquent des problèmes de santé

graves, comme des crampes d'estomac, des irritations de la peau, des vomissements, des nausées, de l'anémie, etc. Les concentrations élevées de zinc peuvent endommager le pancréas et perturber le métabolisme des protéines en provoquant de l'artérioclose. Chez les espèces aquatiques, à partir de quelque mg/l engendre une toxicité aiguë (Mosey, 1976; Rai et al., 1991)

Il y a peu de conséquences à l'exposition chronique, cependant, les principaux effets d'un excès du zinc dans l'organisme s'expliquent par les interférences de cet élément avec les métabolismes du cuivre et du fer principalement d'où des signes d'anémie (Wood, 1977).

II.5.3 Le plomb

Le plomb, de formule chimique Pb, est l'un des métaux toxiques présent dans les différents compartiments terrestres. À la différence de l'As et Zn, le Pb n'est pas un oligo-élément et il possède un caractère toxique bien connu (Nriagu, 1978 *in* Salvarredy, 2008). Il est l'un des quatre métaux les plus nocifs pour la santé et n'effectue aucune fonction essentielle dans le corps humain.

Dans le milieu aquatique, l'action toxique du plomb est variable en fonction de nombreux facteurs tels que le degré de minéralisation de l'eau, la température du milieu, le pH, la lumière et la chimie de l'eau. Le plomb pénètre dans l'organisme par voies cutanée, digestive ou aérienne.

Chez l'homme l'ingestion est la voie d'exposition principale du plomb. L'Organisation Mondiale de la Santé signale à cet effet que le risque grave produit par la forme de Pb inorganique introduite chez l'homme se fait par la voie de la consommation de l'eau (O.P.S., 1987).

Lors d'une inhalation, le plomb passe facilement dans l'organisme, après quelque semaine 90% du plomb conservé dans l'organisme est déposé dans les os (Links et al, 2001) ainsi que dans les autres tissus où il reste emmagasiné pour des dizaines d'années s'il n'est pas remobilisé (grossesse, lactation, vieillesse). Seule la prise de sang pour doser la concentration du plomb permet de poser un diagnostic de certitude.

L'exposition à long terme à des teneurs moyennement faibles du plomb ou l'exposition à court terme à des teneurs élevées peut entraîner:

- **Une toxicité aigüe** : L'ingestion accidentelle ou volontaire unique de plomb provoque des troubles digestifs (douleurs épigastriques, douleurs abdominales, vomissements), une atteinte rénale, des symptômes neurologiques sous forme de convulsions et/ou coma pouvant conduire au décès en 2 à 3 jours (Lauwerys, 1999 et ATDSR 2000)
- **Une toxicité chronique** : l'intoxication chronique cause le saturnisme qui se révèle par une atteinte neurophysiologique, des troubles rénaux, cardio-vasculaires et hématologiques (Goujous, 1995).

Chez l'enfant l'intoxication réside dans une déficience du développement intellectuel, des problèmes de comportement, une altération de la fonction auditive et une perturbation de la croissance. Les symptômes précoces peuvent comporter une fatigue persistante, de l'irritabilité, une perte d'appétit, de l'anémie, des maux d'estomac, un champ d'attention réduit, de l'insomnie, de la constipation et des maux de tête.

Les effets à long terme chez les adultes comprennent une hausse de la pression artérielle, de l'anémie, affection du système nerveux périphérique (retard de développement, irritabilité, troubles du sommeil, perte de mémoire), convulsions, des problèmes rénaux et éventuellement une déficience spermatique (Bisson et al., 2003).

II.5.4 Le cadmium

On peut trouver principalement le cadmium dans la croute terrestre, il est toujours présent en combinaison avec le zinc. On le trouve également dans les pesticides et les engrais, il peut donc pénétrer dans l'environnement via le sol.

Le cadmium est un élément toxique puissant et cumulatif dont la demi-vie biologique dans l'organisme humain dépasse 10 ans. Il peut facilement être absorbé en raison de ses caractéristiques de mobilité et de biodisponibilité. Il peut également passer dans la chaîne alimentaire par l'intermédiaire des végétaux, ou atteint les nappes phréatiques et contamine les eaux destinés à la consommation humaine. Les aliments (légumes, viande, lait) et le tabac constitueraient la principale source d'absorption du Cd pour l'homme.

Après son absorption, le Cadmium passe dans le sang puis dans des organes où il va être concentré dans le foie, les reins et en partie dans le pancréas et la rate. Son excrétion par la voie rénale dépasse rarement 0,5 µg/j (Wilson et al., 1993).

- **Toxicité aiguë:** Les principales manifestations aiguës provoqués par le cadmium sont représenté par des maladies des reins et des os. Accompagnés par des vomissements, des diarrhées, des maux de tête, des frissons, des douleurs musculaires et des nausées.
- **Toxicité chronique:** d'après l'O.M.S., une exposition prolongée au cadmium induit un dysfonctionnement rénale, atteinte pulmonaire, des altérations osseuses, une légère anémie. Il provoque aussi une coloration jaune en bande de l'émail dentaire, une douleur osseuse des membres inférieurs rendant la marche impossible donc la fatigue, l'amaigrissement et l'anémie (Lallogo, 1992 in Ahonon, 2011). Des effets semblables sont apparus lors de la propagation d'une endémique «Itai-Itai » au Japon en 1950 où les eaux avaient été contaminées par le cadmium, et entraînés des atteintes rénales très importantes associées avec une ostéoporose (déminéralisation et fragilisation des os) et des symptômes d'ostéomalacie (déminéralisation et déformation des os).

En outre, le cadmium est aussi considéré comme un élément carcinogène (Waalkes, 2000), ainsi, le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRG) a classé le cadmium exposé à l'homme par inhalation dans la première catégorie «cancérogène pour l'homme».

II.5.5 Le cuivre

Le cuivre est un oligo-élément essentiel à la vie mais à faibles doses (Fergusson, 1990; Alloway et Ayres, 1997), on le retrouve dans les plantes, les animaux et naturellement dans le corps humain où il joue un rôle primordiale dans le bon fonctionnement de nombreuses processus physiologiques : système nerveux et cardiovasculaire, croissance osseuse, et régulation du cholestérol. On trouve souvent 1 à 4 mg dans les viscères de l'Homme (Haguenoer et Furon, 1984). Son manque cause le syndrome de Menke (Plumlee et Ziegler, 2003). Le cuivre est aussi, à des doses plus élevée lors d'une exposition à travers plusieurs vecteurs notamment l'eau potable, la nourriture, la terre et les poussières ou sous ses formes oxydées, considéré comme un puissant poison pour l'Homme, causant une maladie héréditaire appelée la maladie de Wilson (Plumlee et Ziegler, 2003).

Le cuivre est plus toxique sous forme ionique que lorsqu'il est complexé avec la matière organique. Il cause chez l'homme une toxicité aiguë qui se manifeste par des anémies hémolytiques, nausées, vomissements diarrhée, insuffisance rénale et hépatique, troubles du système nerveux centrale, hépatite, cirrhose, tremblement, détérioration mentale et convulsions.

En revanche, la toxicité chronique du cuivre n'a pas encore été déterminée chez l'homme sauf chez certaines populations qui sont victimes de la maladie du Wilson résultant d'un dépôt de cuivre dans les viscères tels que le foie, le cerveau et le rein. Cette maladie se caractérise par une cirrhose du foie et des troubles neurologiques (Lallogo, 1992)

III Exploitation minière et impacts sur l'environnement

III.1 Généralités

L'exploitation minière est une industrie primaire importante, elle consiste à extraire à partir du sous sol les minéraux solides ayant une valeur économique, dont l'importance varie selon les types de minerais. On distingue : les minerais métallurgiques (fer, cuivre, plomb, zinc), les minéraux industriels (calcaire, sel gemme, potasse, gypse), les métaux natifs (principalement l'or et l'argent), le charbon, les sables bitumineux.

L'exploitation minière diffère de l'exploitation agricole et de l'exploitation forestière par le non renouvellement des ressources naturelles. En effet, les minéraux et la roche ne peuvent pas être remplacés après avoir été extraits et utilisés. D'autre part, les métaux ont une caractéristique unique, une fois recyclés ils conservent leurs propriétés élémentaires. En conséquence, l'exploitation minière est susceptible de générer des impacts environnementaux suite aux effets directs et indirects sur le milieu naturel.

III.2 Types d'exploitations minières

L'extraction des minerais peut se faire de deux façons, à ciel ouvert ou souterraine. Le choix de l'une ou de l'autre est fonction de la topographie, de la géométrie, de la morphologie du gisement et de la nature de la roche encaissante (Ennaciri, 2000).

- **L'extraction des mines à ciel ouvert** : est utilisée lorsque les gisements sont peu profonds et présentent un grand tonnage. Les teneurs du minerai dans le gisement peuvent être faibles puisqu'il est possible d'extraire de grandes quantités de minerai à faible coût.
- **L'extraction des mines souterraines** : est utilisée lorsque le gisement est profond. Le taux de production pour ce type d'exploitation est d'habitude plus faible que celui par la méthode à ciel ouvert, en raison des contraintes de production liées à l'exploitation souterraine.

III.3 Phases et opérations d'exploitation

Les opérations de mises en œuvre sur un site minier, en vue d'exploiter et de valoriser un gisement peuvent être divisé en trois voire parfois quatre étapes principales (Ennaciri, 2000) :

- Les travaux nécessaires pour donner accès au gisement, correspondent aux travaux de déblaiement dans le cas d'une mine à ciel ouvert, de percement de galeries et puits dans le cas d'une mine souterraine ;
- Les travaux liés à l'extraction du minerai (tout venant) et à son tri préliminaire, nécessaire pour minimiser la quantité de roche stérile ou « gangue » présente dans le minerai ;
- Un ensemble de filières de traitement regroupées dans une usine d'enrichissement ou laverie. Elles sont utilisées pour séparer les phases porteuses de l'élément valorisable de la gangue stérile. Le produit de l'usine appelé le concentré constitue le plus souvent le produit marchand de la mine ;
- Une fonderie ou une usine de grillage édifiée, dans certains cas lors des exploitations anciennes, à proximité d'un ou de plusieurs sites miniers voisins pour transformer l'élément valorisable du concentré en élément métallique.

III.4 Impacts de l'exploitation minière sur l'environnement

Les deux types d'opérations minières, à ciel ouvert et souterrain, produisent des déchets miniers, présentant généralement des caractéristiques physico-chimiques différentes pouvant être importantes et perdurer plusieurs siècles après la fermeture des mines (Coulthard et Macklin, 2003; Boularbah et al ., 2006). Et par conséquent, entraîne des nuisances pour l'environnement potentiellement assez différentes (BRGM., 1999 ; D.M., 1999) à savoir :

- Perturbation et changements du paysage et des volumes de roches qu'elle concerne (Alloway et Ayres, 1997 ; Custer, 2003) ;
- Pollution de l'eau par le drainage minier acide issue de lessivage des minéraux oxydés, généralement c'est le cas d'oxydation des sulfures. En effet, les dépôts de déchets miniers également en contact libre avec l'environnement, génère un grand changement de conditions de stabilité de ces substances chimiques (Alloway et Ayres, 1997 ; Custer, 2003 ; Price, 2003) ;
- Impact lié à la génération de poussières atmosphériques via la mobilisation des matériaux produits à l'aide d'explosif (Stocks et al., 1974). Ces derniers peuvent affecter les êtres vivants ;

- Dégradation de la qualité des sols au voisinage des sites miniers notamment en aval par des transports de sédiments contaminés en métaux (Liu et al., 2005) ;
- Pollution et dégradation de la qualité des eaux souterraines ;
- Problème de sécurité publique suite à la création de cavités entraînant des effondrements ou affaissements (Down et Stocks, 1977 ; Younger, 1997);
- Risques liés à la présence d'installations de surface non protégées pouvant compromettre la sécurité publique telles que les ateliers, laveries, etc.

Les déchets provenant de différentes étapes de l'exploitation minière, sont stockés sous forme de digues au niveau des sites d'extraction. Toutefois, ces digues peuvent être à l'origine de sérieux accidents environnementaux.



**CHAPITRE II:
RESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE**

I. Situation géographique

Le bassin versant de la Moulouya couvre presque la majeure partie du Maroc oriental, il s'allonge de la zone de partage des eaux du Ziz et de l'Oum Er-Rebia, jusqu'à la Méditerranée avec une superficie de 54000 km², soit 7,5% de la surface du pays. Géographiquement, il se situe entre les latitudes 32°18' et 35°8' Nord et entre les longitudes 1°11' et 5°37' Ouest.

Le bassin versant de la Moulouya est limité au Nord-Ouest par les bassins côtiers méditerranéens, à l'ouest par le bassin versant de l'oued Sebou, au Sud-ouest par le bassin versant de l'oued Oum Er Rebia, au Sud par le bassin versant de l'oued Ziz et au Sud Est par le bassin versant de l'oued Guir. A l'Est on trouve le territoire Algérien.

L'oued Moulouya, l'un des plus grands fleuves du Maroc, prend ses sources à Alemssid (Région d'Aghbala) à 2000m d'altitude près de Midelt à la jonction de la chaîne Moyenne et Haute Atlasique. Son écoulement s'étend sur plus de 500km avec une forte variabilité.

De point de vue géomorphologie, le bassin versant de la Moulouya est subdivisé en trois sous bassin : la Haute Moulouya (H.M.), la Moyenne Moulouya et la Basse Moulouya.

La Haute Moulouya est une dépression dont la superficie couvre près de 4500km². Elle se caractérise par un relief très accidenté et une altitude variant entre 1400 à 1800m (Figure 9). Elle est limitée au Sud par le Haut Atlas, au Nord et Nord-Ouest par le Moyen Atlas, la limite Est est constituée par les massifs primaires de Boumia et d'Aouli. Le point culminant est le Jbel El Ayachi avec 3750 m. Son relief est généralement accidenté, avec 22% de zones montagneuses, 71% de collines et plateaux ; et 7% de plaines (Amercid, Itzer).

La Haute Moulouya constituait l'un des plus gros districts Pb-Zn du royaume du Maroc, avec ses districts miniers Aouli- Mibladen –Zeïda (Fig. 9).

II Géologie régionale

Les principales unités lithologiques reconnues dans la Haute Moulouya sont représentées sur la colonne stratigraphique ci dessous (Fig.10).

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
		Sup.	Marnes à calcaires	20
	Lias	Moy.	Dolomies karstiques à intercalations marneuses	200
		Inf.	- Calcaires dolomitiques et dolomies à Hesperithyris. - Calcaire argileux-dolomies	200
			Shales grés-argileux. Argillites rouges supérieures	15 10-20
Trias	Sup.	Basalte verte	100-200	
	Inf.	Argiles rouges inférieurs Cgts-grès-marnes-Arkoses	50	
Paléozoïque			Schistes, quartzites et amphibolites	

Figure 10 : Log stratigraphique synthétique de la Haute Moulouya et ses bordures atlasiques (Naji, 2004 in Amrani, 2007).

Vers la base, on trouve des formations paléozoïques représentées par des granites, d'amphibolites et de schistes métamorphiques formant les moles Hercyniens des massifs de Boumia-Zeïda à l'Ouest et le massif d'Aouli à l'Est. La série se poursuit par des formations triasiques qui affleurent en discordance sur les massifs primaires, constitués à la base par des conglomérats à ciment rouge gréseux (Felenc et Lenoble, 1965) et des arkoses surmontés d'une série détritique argileuse rouge inférieure (jebel Bouselloum). Ces arkoses sont parfois en contact direct avec le massif granitique (Nasloubi, 1993). L'ensemble est surmonté d'une série puissante de basaltes (250 m d'épaisseur) gris, altérés. La série jurassique scellant cet

ensemble est constitué par des faciès calcaro-dolomitiques et parfois des calcaires marneux. Ces formations carbonatées affleurent presque toujours sous forme de massifs disloqués en blocs et en brèches karstiques (Laouina, 1990).

Le crétacé débute par des marnes et des grès rouges (Cénomanién inférieur) Surmonté par de marnes jaunes ou vertes (Cénomanién supérieur) et suivis de calcaires blancs (Turonien). Cette série affleure tout le long du Moyen atlas et entre le massif d'Aouli et le Haut Atlas, à l'Est de Midelt (Combe et Simonot, 1971) (Fig. 11).

Les formations quaternaires sont surtout constitués par des éboulis, des conglomérats, des argiles rouges, des limons, des encroutements calcaires ou par des coulés basaltiques formant des terrasses fluviales. Elles affleurent sous forme de séries emboîtées et recouvertes de dépôts essentiellement limoneux et d'étagement conglomératiques. Ce sont des terrasses fluviales, modérément disséquées et consolidées, affleurant sur les deux rives de l'oued Moulouya.

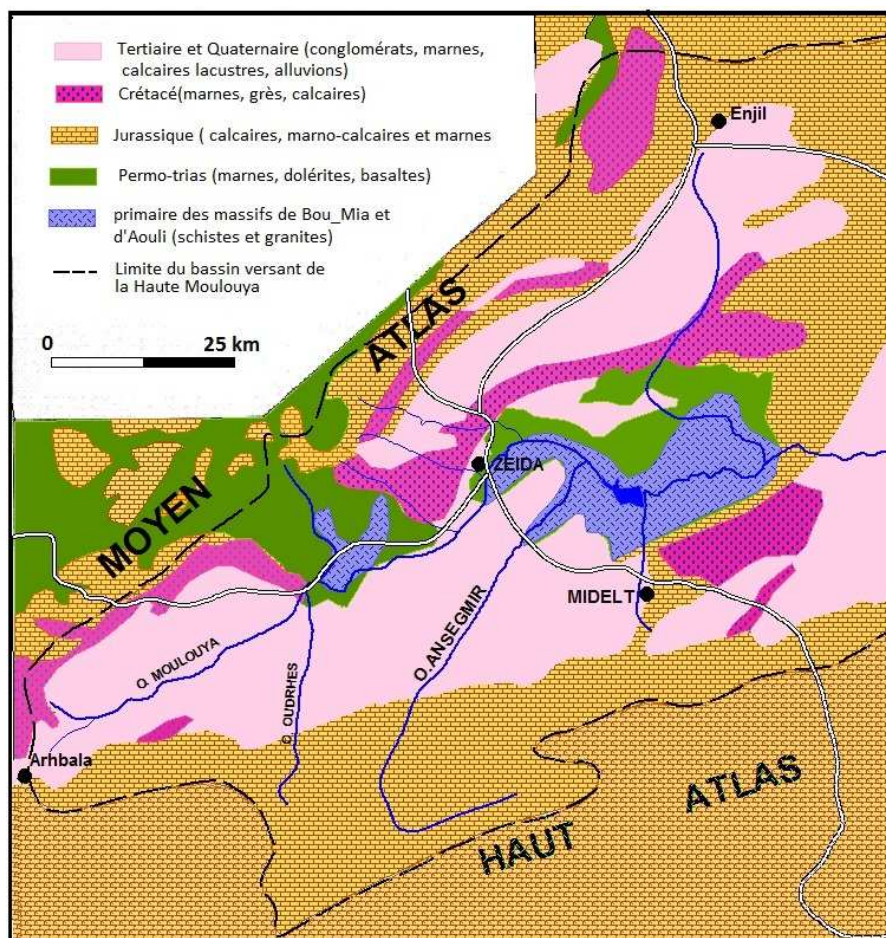


Figure 11 : Schéma géologique de la Haute Moulouya

III. Climat du bassin versant de la Moulouya

Le bassin versant de la Moulouya est caractérisé par une diversité de relief, ce qui influence sur le type du climat, on peut distinguer trois zones climatiques (Combe et Simonot, 1971) :

- un climat méditerranéen au Nord-est du bassin,
- un climat continental au niveau de la moyenne Moulouya,
- un climat semi-aride mésothermique sec à tendance montagnarde marquée dans la Haute Moulouya.

III.1 Précipitations

Les précipitations varient dans l'espace et dans le temps dans le bassin versant de la Moulouya (Ahamrouni, 1996) :

- **Variation des précipitations dans l'espace :**

La pluviométrie annuelle est de l'ordre de 250mm. A cause des hautes barrières montagneuses ouest, les régions les mieux arrosées sont les montagnes méditerranéennes des Beni Snassen, celles de la chaîne des horsts et les sommets occidentaux de Berkane où les précipitations peuvent dépasser 400 mm/an. Alors que les zones les moins arrosées sont situées au niveau des dépressions de la moyenne vallée de Moulouya où les précipitations n'atteignent pas les 200 mm/an. Les hauts plateaux reçoivent entre 200 et 300 mm/an.

Au niveau de la Haute Moulouya, la moyenne pluviométrique annuelle atteint 300 mm et varie en fonction de l'altitude. Elle atteint 660mm à Arhbala et ne dépasse guère 206mm à Zeïda pour les altitudes respectivement de 1800 et 1470 m (EL Hachimi, 2006).

En Haute Moulouya, les précipitations sont souvent sous forme de neige et de pluies irrégulières qui se produisent au niveau des altitudes (1400-1800m). Elles jouent un rôle important dans l'alimentation des sources et des oueds pérennes. Ces précipitations neigeuses persistent pendant longtemps (plusieurs jours voire quelques semaines).

- **Variation des précipitations dans le temps**

La distribution des pluies mensuelles du bassin versant de la Moulouya varie selon les périodes de l'année. D'après Combe et Simonot (1971), les précipitations maximales sont atteintes en hiver (novembre/décembre) et parfois un second en printemps (Avril/Mai), alors que les minimales sont enregistrées en été (Juillet/Août). À l'échelle interannuelle, la

variation des pluies est irrégulière avec une alternance d'années sèches et humides (Fig. 12, fig. 13).

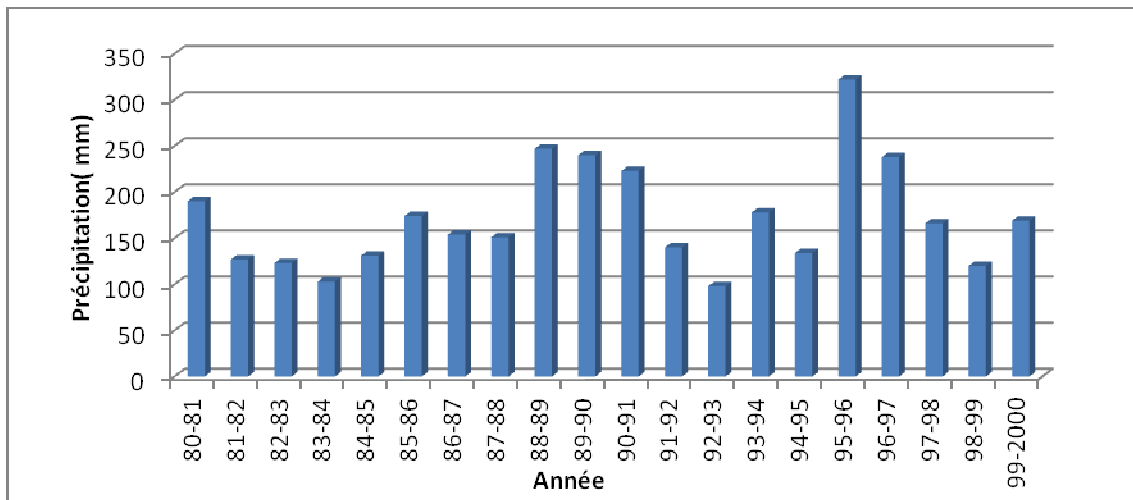


Figure 12 : Précipitations moyennes annuelles observées à la station Zeida (1980-2000) (D.G.H., 2013)

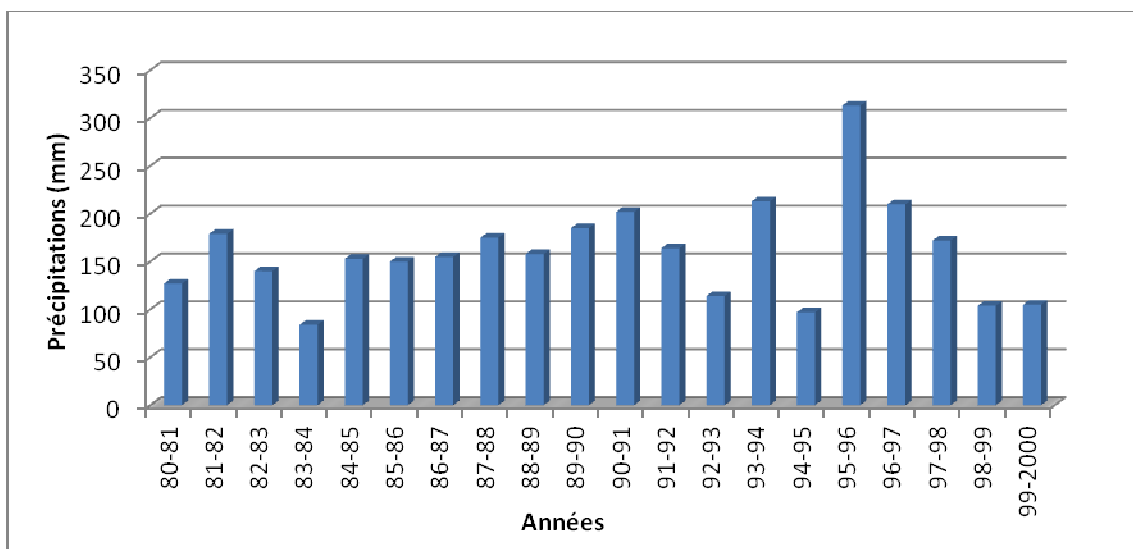


Figure 13 : Précipitations moyennes annuelles observées à la station Ansegmir (1980-2000) (D.G.H., 2013)

III.2 Température

De point de vue température, le bassin est caractérisé par des saisons froides et longues d'importance variable selon l'altitude et la continentalité, ainsi que des saisons chaudes supportables.

Les moyennes annuelles des températures sont de l'ordre de 12 à 14°C. Les moyennes des maxima des mois les plus chauds (Juillet, Août) varient entre 32 et 33°C. Le mois le plus

froid (Janvier) présente des minima moyens de 0°C et atteint parfois des valeurs négatives. Les écarts entre moyenne des températures maximales et minimales sont importants en été, ils sont de l'ordre de 30°C .

III.3 Vents

La zone d'étude est dominée par trois types de vents variables suivant les saisons : En hiver, les vents soufflent de l'ouest par-dessus les barrières moyennes atlasique et rifaine ; entraînant des masses d'air atlantique froide et humide. En été deux types de vents violents dominant : le Chergui (vents d'Est) et le Sirocco (vents de Sud). Ils entraînent des masses d'air sec et chaud arrivant de régions sahéliennes.

III.4 Evaporation

L'évaporation moyenne annuelle varie du SW au NW, de 2800mm à Midelt à 4300 mm vers Missouri dans la Moyenne Moulouya.

IV. Ressources en Eau

Les ressources en eau du bassin versant du Moulouya sont représentées par des ressources en eaux de surface et des ressources en eau souterraines:

- L'oued Moulouya, principal cours d'eau du bassin. Il prend naissance au niveau de la jonction de la chaîne du Haut et du Moyen Atlas. Il joue un rôle socio-économique important pour les habitants de la région (irrigation, abreuvement, eau potable, industries...).
- Les principaux affluents de l'oued Moulouya qui sont à écoulement pérenne : oued Ansegmir dans la Haute Moulouya, et deux oueds Melloulou et Za dans la basse Moulouya.
- Les réservoirs d'eaux souterraines dont l'importance quantitative et qualitative varie en fonction des structures géologiques, de la nature lithologique des réservoirs et des conditions climatiques.
- Au niveau de la Haute Moulouya, un autre type de ressources en eau, est représenté par des lacs de carrières, issus d'anciennes carrières de la mine abandonnée (Zeïda, Mibladen). Ces eaux, issues des nappes et de ruissellement, sont utilisées par les riverains de la haute Moulouya sans aucun traitement préalable.

Les mesures des débits dans la Haute Moulouya sur les stations de Jaugeage de la direction de l'hydraulique (D.H.) à savoir : la station de Zeïda, sur l'oued Moulouya à 1470m d'altitude en amont du pont de la route principale N° 21 (R.N.21), la station

Ansegrim sur l'affluent oued Ansegrim en aval du pont de la route principale N° 21 à l'altitude 1400 m ont données les résultats (Fig. 14 et 15) pour la période 1980-1999.

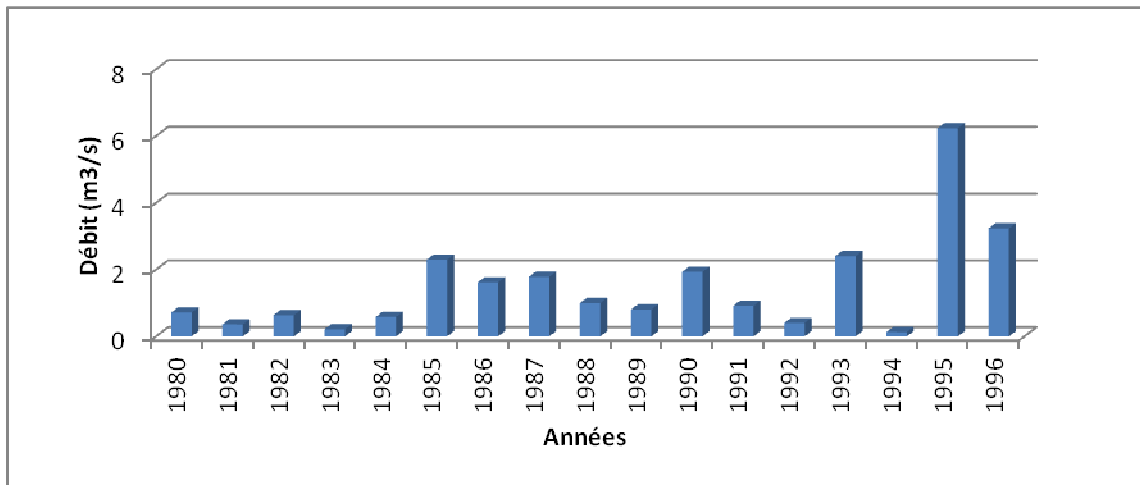


Figure 14 : Débits moyens annuelles en m³/s (1980-1996) de l'oued Moulouya à la station Zeida (D.G.H)

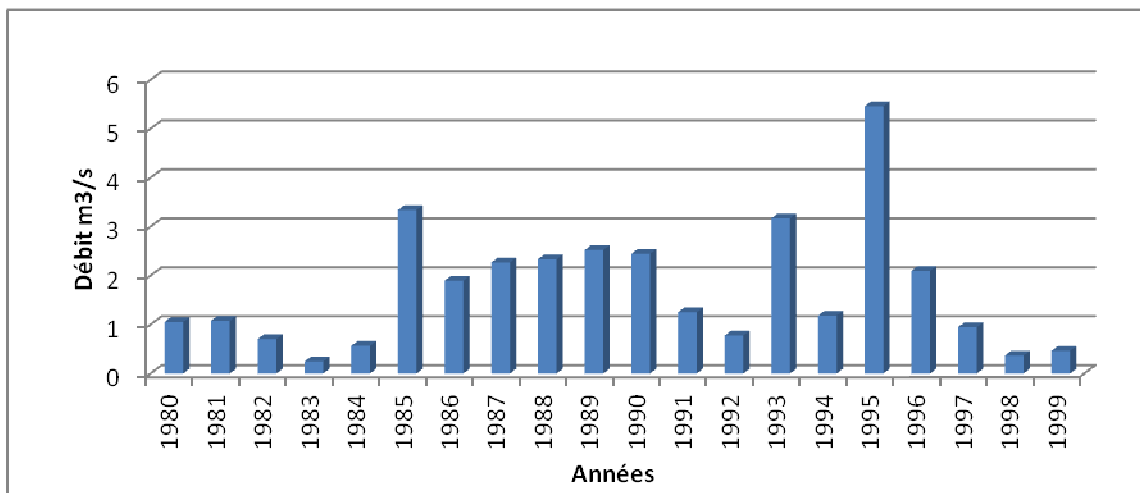


Figure 15 : Débits moyens annuelles en m³/s (1980-1999) de l'oued Ansegrim (D.G.H)

IV.1 Hydrologie :

Le bassin versant de la Moulouya est drainé par un réseau hydrographique très dense, dont l'oued Moulouya est le principal cours d'eau de la région. Il reçoit un grand nombre d'affluents avant de se jeter en Méditerranée avec un volume moyen d'eau écoulé de 1179Mm³/an dont 633Mm³/an sont des apports de la Haute Moulouya (DGH, 2003). Il est d'une longueur de 520km et représente le plus grand fleuve Marocain. Il prend une direction S-W au niveau de l'amont du bassin puis une direction SW-NE à la sortie des Béni-Snassen.

Au niveau de la Haute Moulouya, plusieurs affluents alimentent la zone, et par conséquent, ils influencent sur le débit de la Moulouya, il s'agit des oueds : Oudrhès, Ansegmir, Outat, Adeghoual, Mibladen, Bousselloum, Bou-Adil et AgouniDara, de la rive droite. Sur la rive gauche on rencontre les oueds d'origine du moyen atlas : Kiss, Aguercif, Boulajoul, Sidi Ayad et Amrhid (EL Hachimi, 2006)

Ces cours d'eau, excepté l'oued Ansegmir, ont un régime hydrologique très irrégulier marqué par un étiage en grand partie de l'année et des crues violentes ayant lieu uniquement suite aux pluies très importantes et bien prolongées entraînant une forte érosion de leurs lits. Quant à l'oued Ansegmir, le principal affluent de la haute Moulouya (Fig.16), il prend sa source dans le haut atlas et tout particulièrement par la fonte des neiges de Jbel Ayachi, il est long de 80km et draine une superficie de 800km² (Ahamrouni, 1996).

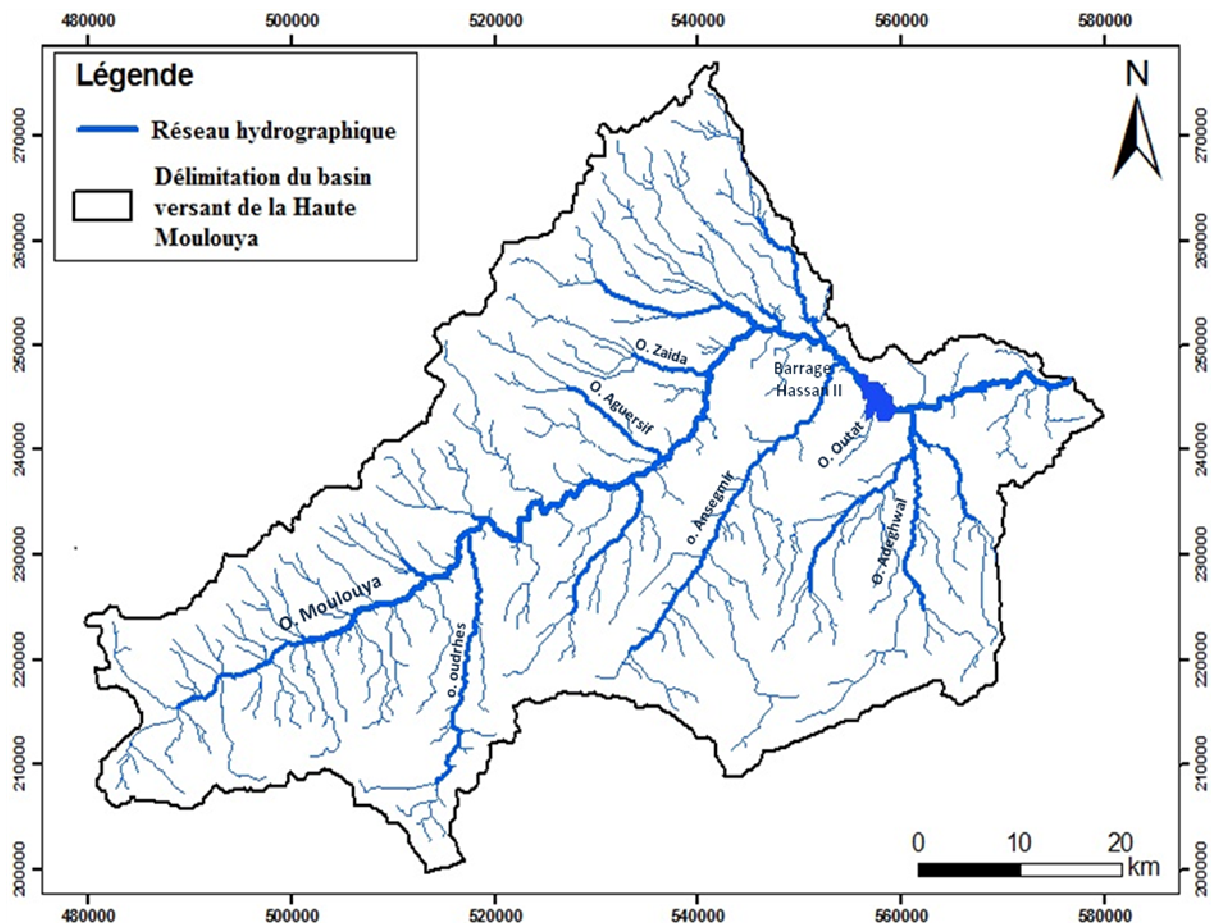


Figure 16 : carte hydrologique de la Haute Moulouya

IV.2 Aménagements hydraulique de la région: barrage Hassan II

Le Barrage Hassan II (X = 558.900 et Y = 224.250), anciennement appelé Sidi Saïd, est implanté au niveau de la haute Moulouya à environ 12km au Nord de la ville de Midelt. Sa capacité est évaluée à 400Mm³. Il permet de régulariser un volume annuel d'eau de 100 Mm³ des apports d'oued Moulouya (DGH., 2001). La retenue du barrage est d'une superficie de 12,7 km². Le barrage Hassan II se situe au centre des districts miniers Aouli-Mibladen-Zeïda à une quinzaine de kilomètres en aval du centre miniers Zeïda (Fig.17).

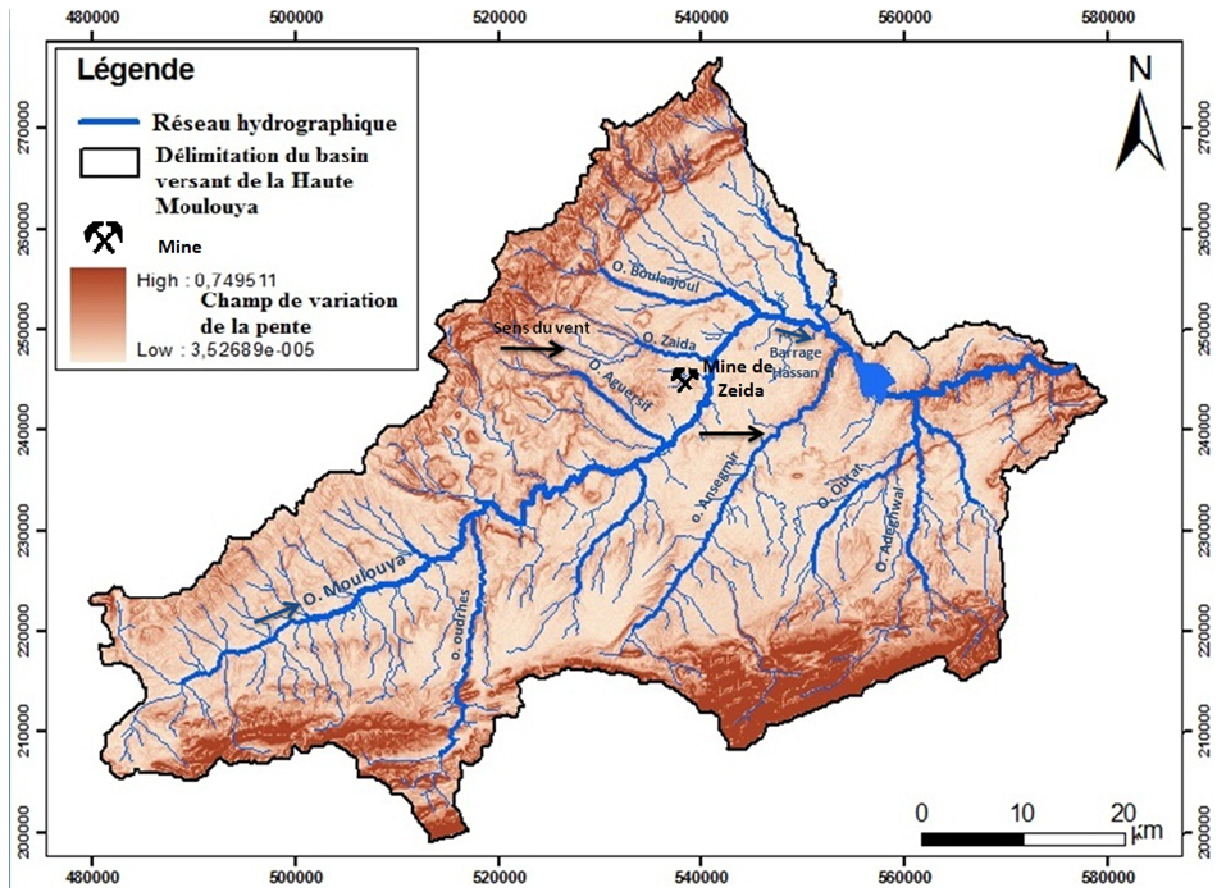


Figure 17 : Situation géographique du barrage Hassan II en Haute Moulouya

Le Barrage Hassan II (Fig. 18) est un Site qui dépend du ministère de l'énergie des mines et de l'environnement (département de l'eau), il assure les fonctions suivantes :

- ❖ amélioration de l'irrigation des périmètres de la basse Moulouya sur un équipement près de 65000ha ;
- ❖ meilleure gestion des crues et la protection du complexe Mohamed V-Merchàa Homadi contre l'envasement ;
- ❖ apport d'un volume d'eau de près de 2Mm³ pour le soutien de l'approvisionnement en eau potable de la zone de Missouri et de Midelt ;

- ❖ Protection de la région avale, moyenne et basse Moulouya, contre les inondations.



Figure 18 : photo du Barrage Hassan II, Haute Moulouya (Février 2013).

IV.3 Hydrogéologie

Concernant les ressources en eau souterraines, les réservoirs dans lequel s'accumulent les eaux pluviales infiltrés sont d'inégale importance à cause de la diversité géologique de la haute Moulouya d'une part, et de l'inégale répartition de la pluviométrie d'autre part. Parmi les nappes les plus importantes, on distingue (Derrar, 1996 *in* EL Hachimi, 2006) :

- ❖ La nappe profonde des calcaires du Lias, donnant naissance à plusieurs sources importantes (1m³/s). Ces résurgences d'eaux soutiennent les écoulements de l'oued Moulouya et Ansegmir.
- ❖ La nappe des calcaires du Crétacé, avec une quinzaine de sources débitant globalement une moyenne de 215l/s (6,8Mm³/an) utilisées pour l'irrigation et 1214 forages et puits, fournissant 175l/s (5,5 Mm³/an) pour l'irrigation de 2050ha (BHM, 2005).
- ❖ La nappe des conglomérats du Miocène, exploitée par plus de 400 puits avec un débit global proche de 200 l/s.
- ❖ La nappe des alluvions quaternaires, est le siège des sous écoulements des oueds. Son exploitation se fait par des puits et par des forages.

V. Présentation de l'exploitation minière dans la Haute Moulouya

V.1 Minéralisations de la Haute Moulouya

La Haute Moulouya a fait l'objet de nombreuses études à caractère minier. Les premiers travaux de la cartographie et de la métallogénie ont été effectués par Bouladon en 1959. D'autres travaux ont été effectués par Amade et Emberger entre 1965 et 1970. Ces travaux se sont intéressés aux gisements d'Aouli, Mibladen et de Zeïda, connue sous le nom du district plombifère de la Haute Moulouya, ayant constitué les plus importants gisements de plomb au Maroc. Il couvre une surface de 75 Km de long et 20 Km de large allongée E-W (Emberger, 1965a). En effet, les gisements d'Aouli (1926-1985) de Mibladen (1936-1985) et de Zeïda (1972-1985) ont pour longtemps assuré la part importante de la production plombifère au Maroc (Tab.2).

Tableau 2 : Réserves aux centres miniers de la Haute Moulouya (BRPM, 2003)

	Année	Réserves (t)	Teneurs Pb %
Aouli	1979	605 000	4,60
	1980	1 318 000	4,46
Mibladen	1979	106 000	5,30
	1980	136 000	4,72
Zeïda	1973	8 026 000	2,38
	1974	7 000 000	/
	1979	11 500 000	7
	1981	8 200 000	5,3
	1982	1 318 000	9,22

La minéralisation dans la Haute Moulouya est répartie dans divers formations. Elle comprend trois formes minérales principales :

- ❖ Gisement d'Aouli comporte une minéralisation de type filonienne à galène (PbS), barytine (BaSO₄), pyrite (FeS₂), Chalcopryrite (CuFeS₂), Blende (ZnS) et fluorine (CaF₂) ;
- ❖ Gisement de Mibladen renferme une minéralisation de type stratiforme à galène, barytine, cérosite (PbCO₃), vanadinite, Wulfénite et anglésite (PbSO₄) ;
- ❖ Gisement de Zeïda comprend une minéralisation de type imprégnation stratiforme à galène et cérosite dans les arkoses du Trias.

Selon Emberger (1965), la mise en place de ces gisements est due principalement à des facteurs tectoniques. Une relation étroite existe entre les amas minéralisés et les principales failles dans le district de la Haute Moulouya (Fig.19).

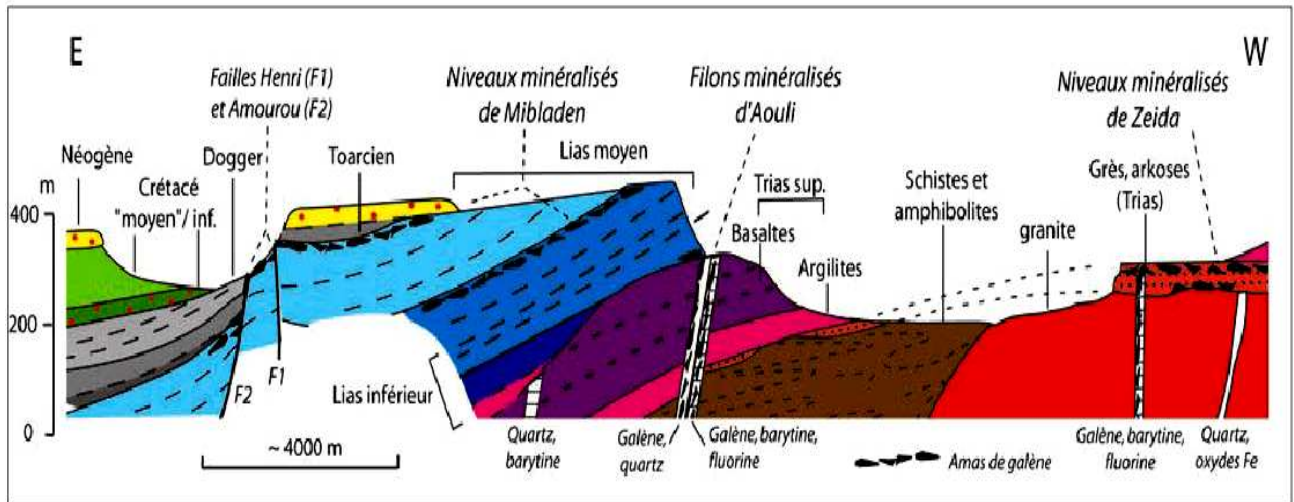


Figure 19 : Coupe géologique montrant la position des minéralisations dans la boutonnière de la Haute Moulouya (d'après Emberger, 1965b ; modifié par Mouttaqui et al, 2011).

V.2 Le site minier de Zeïda, historique et technique d'exploitation et état actuel des lieux :

Dans le présent travail, on s'intéressera uniquement à l'étude de la minéralisation de Zeïda situé dans la zone d'étude choisie. Ce gisement a fait l'objet de plusieurs études et travaux antérieurs (Emberger, 1965 et 1970 ; Amade, 1956). Il est situé à 30 Km au NW de Midelt et présente une superficie de 600 Km². Il se localise sur les berges et sur le parcours de l'oued Moulouya. La minéralisation est encaissée dans des grès feldspathiques, des arkoses ou des conglomérats arkosiques clairs bien ou mal cimentés par la baryte rose ou blanche, de la silice, et dépourvue de carbonates et de tout pigment ferrugineux. Cette minéralisation d'âge triasique, se répartit géométriquement sous forme de panneau d'arkoses superposés et séparés par des intercalaires stériles de grès jaunes, de grès argileux rouges ou d'argilites rouges (Fig. 20).

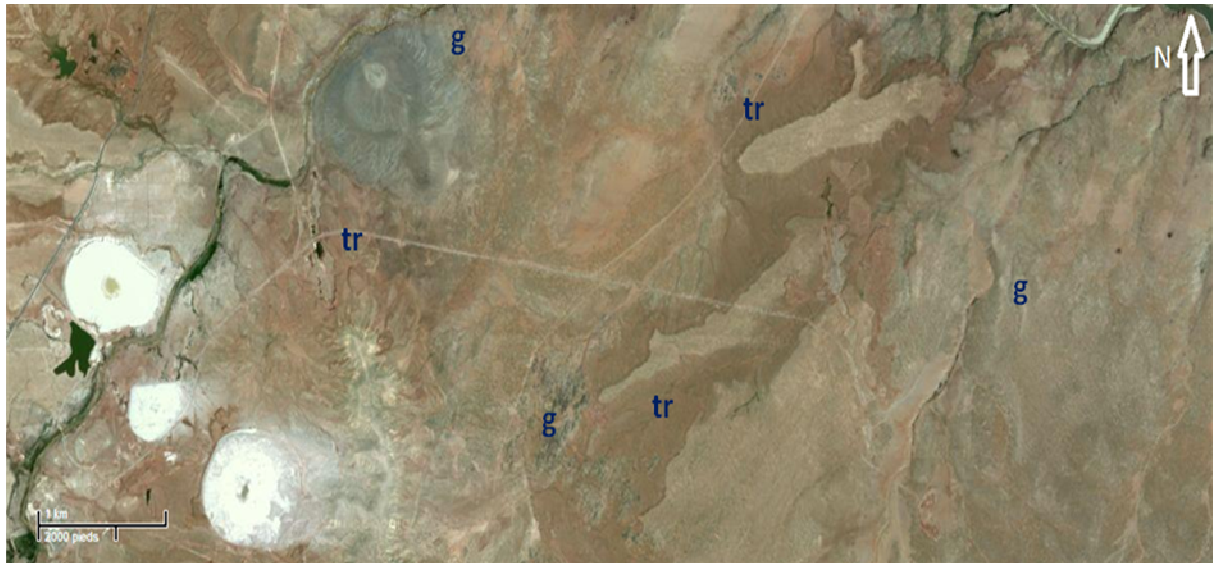


Figure 20 : Exploitation des minéralisations de Zeïda dans les arkoses et grès rouges du Trias (tr) transgressifs sur la paléosurface horizontale du granite varisque (g) (Mouttaqui et al, 2011)

La minéralisation de Zeïda a été découverte par le Bureau de Recherches et de Prospection Minières (BRPM) en 1958. Les études exploratoires se sont développées par la suite par le même bureau et par la SODIM, créée en 1966 (50 % BRPM et 50 % Société Zellidja). Jusqu'en 1973, 200km de sondages sont réalisés (Anonyme, 1996b), et le gisement entre en exploitation dès 1972. Jusqu'en 1985, la mine a fourni 16 145 000 de tonnes de tout-venant, avec une richesse 3,6 % du Pb soit 630 373 tonnes de concentré de plomb, moins du quart de la production d'Aouli-Mibladen ; les réserves résiduelles sont estimées à 8 Mt (Wadjinny, 1998).

Le centre minier Zeïda a été le siège de l'exploitation intense du minerai de plomb pendant une dizaine d'année, de 1975 à 1985 (Fig.21). Ce dernier était sous forme de Cérusite (à 70%) et de galène (à 30%). L'exploitation était en carrière à ciel ouvert. La puissance de la couche de minerai exploitée varie de 5 à 7 mètres et se répartissait dans des panneaux en bancs superposés, celle de la couche de stérile est de 20 à 50 mètres (DMR., 1990).

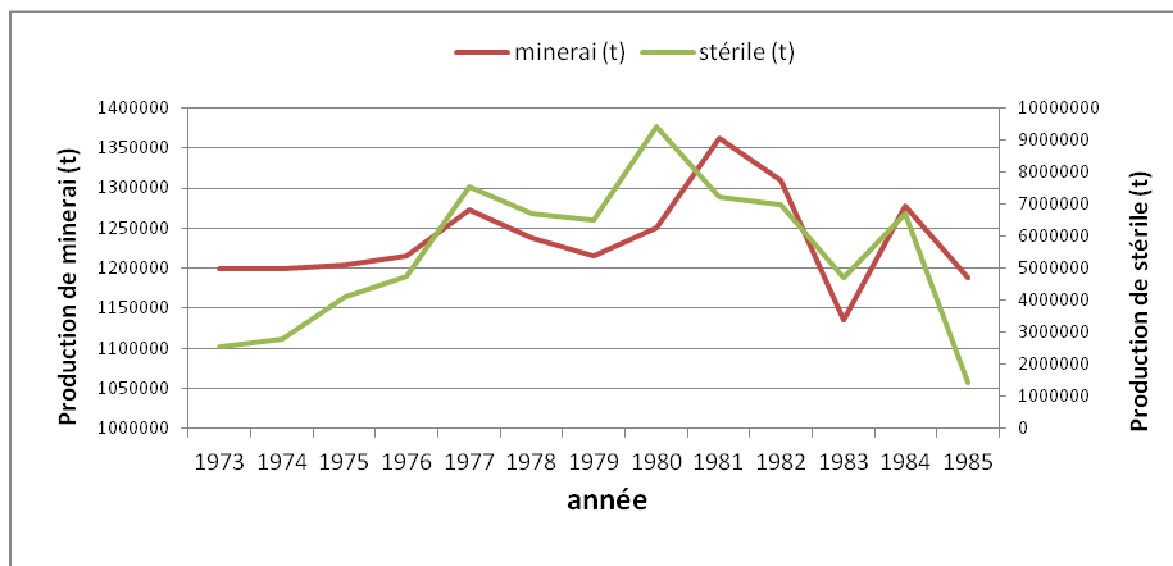


Figure 21 : Production réalisée au centre minier Zeïda de 1973 à 1985 (BRPM, 2003)

L'usine de traitement de Zeïda est implantée non loin des premiers panneaux exploités et près de l'oued Moulouya sur sa rive droite. La capacité de traitement de la laverie de Zeïda était de l'ordre de 1.400.000 t /an de tout-venant, soit à peu près 4000 t/j (DMR., 1990). L'eau primaire de traitement était pompée de l'oued Moulouya. Le traitement du minerai était effectué en 5 étapes: concassage, broyage, flottation, filtration, la verse (DMR., 1990). Durant les 14 années d'exploitation, 630.172 t de concentré de Plomb à une teneur de 40 à 70 % ont été produites, engendrant plusieurs millions de tonnes de résidus miniers abandonnés sans réhabilitation sur les berges de l'oued Moulouya.

Le diagnostic de l'état actuel de surface et des nuisances majeures causées par l'exploitation minière et par l'abandon sans réhabilitation des centres miniers de la Haute Moulouya (Zeïda, Mbladen, Aouli), en particulier l'évaluation du niveau de contamination par les éléments traces métalliques (ETM) toxiques des eaux de surface, des sédiments des sols, des végétaux et des résidus de traitement au voisinage du centre minier ont été réalisés (EL Hachimi, 2006). Le centre minier de Zeïda, abandonné possède un haut potentiel de pollution. L'impact environnemental est confirmé. En effet, au voisinage du centre minier de Zeïda, la perturbation du milieu suite aux modifications topographiques est visible (Fig. 22): des résidus de traitements en digues sans végétation, Une dizaine de terrils de forme conique et dépassant 20 m de hauteur chacun, éparpillés, sans couvert végétal, une dizaine de carrières profondes ; il s'agit d'excavations d'une superficie de 1 ha à 10 ha chacune, des installations de surface : ateliers, laveries, matériel abandonné. Le centre minier abandonné a un effet non

seulement sur l'esthétique de l'environnement de la région, mais aussi sur les eaux de surface et les sédiments au voisinage de ce dernier, contaminés par les éléments traces métalliques Toxiques (EL Hachimi, 2005).

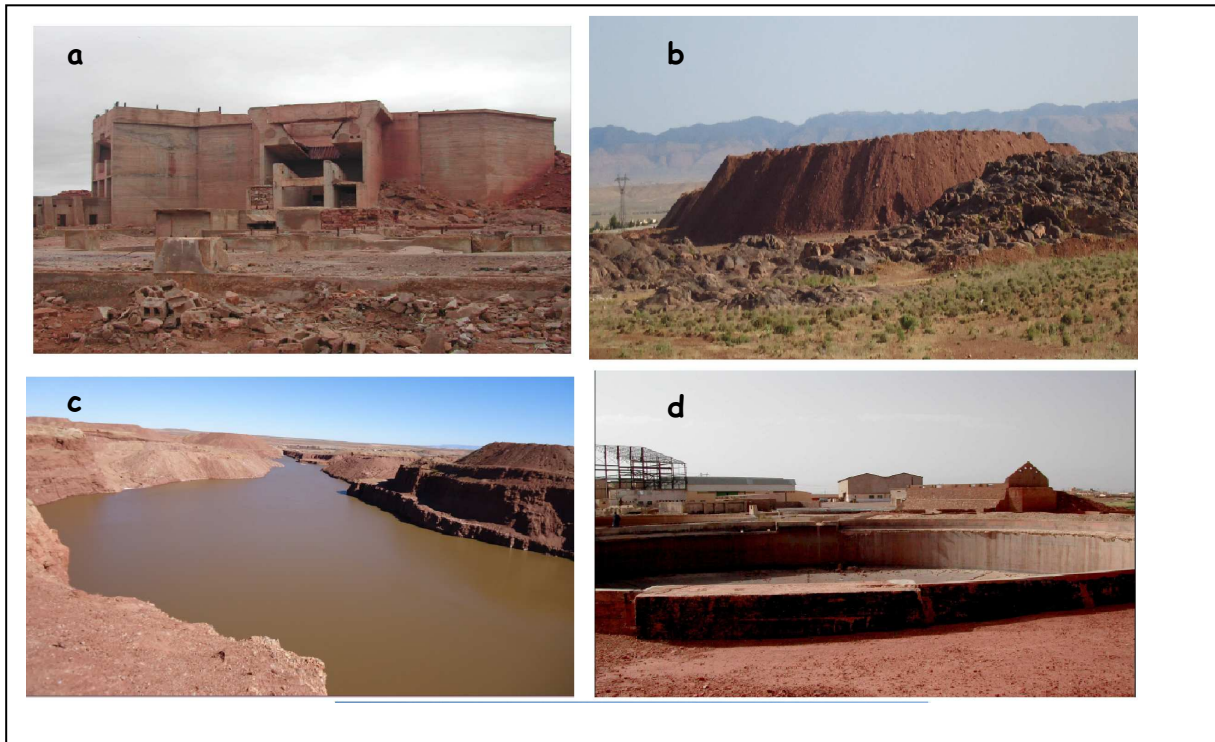


Figure 22 : Mine de Zeïda, état actuel de surface :a: Station de concassage ; b: Terril; c : Lac de carrière ; d : Laverie et bassin de décantation



**CHAPITRE III:
MATERIELS ET METHODES**

I. Choix des stations d'échantillonnage

Les prélèvements des échantillons d'eau ont été effectués pendant deux campagnes. La première a été effectuée en période d'hiver (15 et 16 Février 2013) et la deuxième en période sèche (1 et 2 Juin 2013). Ces prélèvements ont été réalisés le long de l'Oued Moulouya, oued Ansegnir et du barrage Hassan II au niveau de la Haute Moulouya.

La densité d'échantillonnage a été déterminée en fonction des objectifs de l'étude, de la sorte qu'elle soit représentative des variations spatiotemporels des paramètres physicochimiques et d'évaluer l'impact de la mine de Zeïda sur la retenue du barrage Hassan II situé en aval, mais aussi, elle a été conditionnée par le relief et les voies d'accès.

Les points d'échantillonnages, sont déterminés après repérage à l'aide d'une carte topographique et carte Google earth de la zone d'étude. Cependant, leurs positions géographiques ont été déterminées par un GPS sur terrain. L'échantillonnage a concerné dix stations avec six stations réparties sur l'oued Moulouya entre la mine zeïda et le barrage, deux stations sur l'oued Ansegnir et autres deux au niveau du barrage Hassan II (Fig.23).

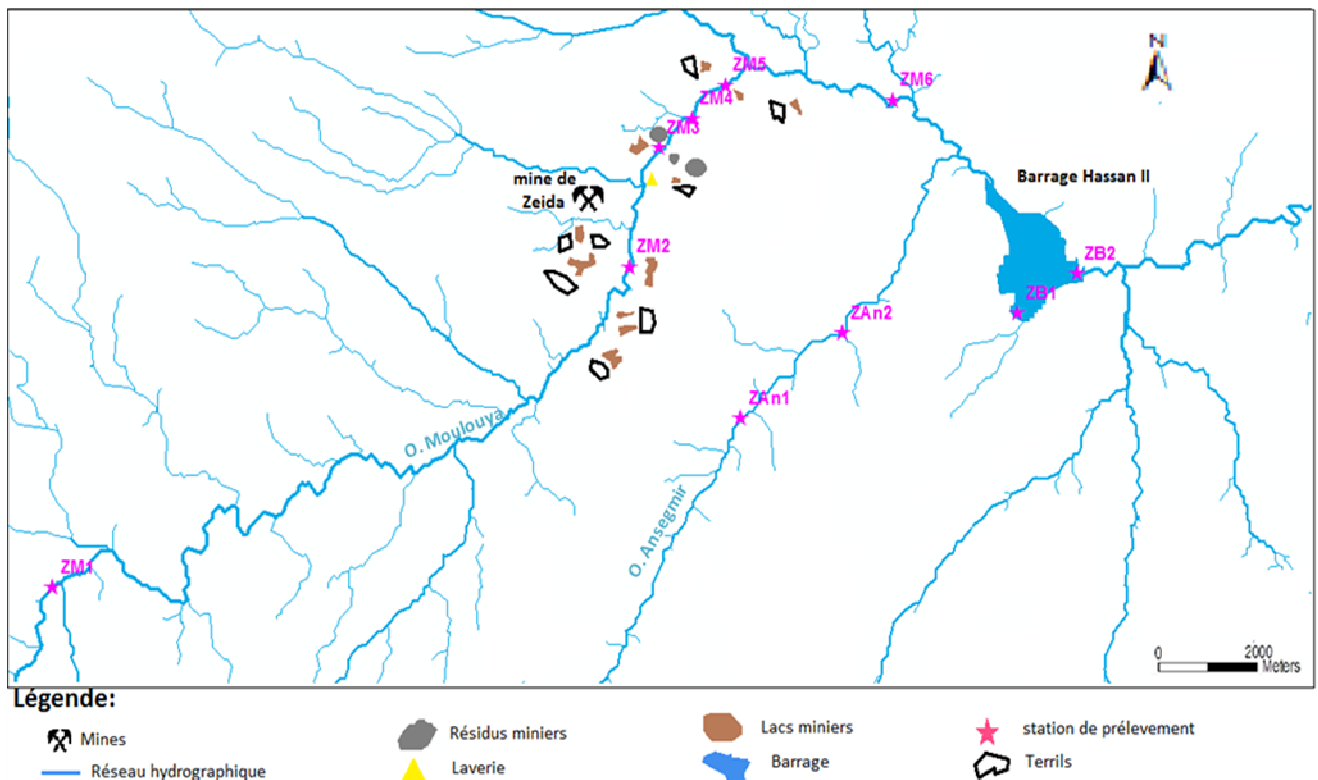


Figure 23 : Situation des stations d'échantillonnage des eaux

II. Protocole d'échantillonnage

L'échantillonnage a été réalisé dans des flacons en polyéthylène. Après avoir rincées les bouteilles deux à trois fois avec de l'eau à échantillonner, on les met dans le sens inverse à l'écoulement tout en évitant toute contamination de manipulation, une fois remplies, les flacons sont hermétiquement fermés.

Au niveau de chaque station, deux échantillons de volume 250 ml ont été prélevés:

- Un échantillon destiné aux analyses des éléments traces métalliques (ETM). Cet échantillon est immédiatement filtré par des filtres à seringue de 0,45µm. Le filtrat a été immédiatement acidifié par l'ajout de l'acide HNO₃ 4% pour fixer les ETM. Ces échantillons ont été conservés à froid à 4°C, transportés et Stockés jusqu'au moment de l'analyse.
- Un deuxième échantillon destiné aux diverses autres analyses chimiques a été prélevé. Cet échantillon non filtré a été conservé et transporté dans les mêmes conditions que le précédent. Certaines analyses chimiques ont été réalisées dès l'arrivée au laboratoire.

Dans chaque station les paramètres pH, Température, C.E., Eh, O₂ dissous, débit des eaux ont été mesurés au moment des prélèvements.

III. Méthodes de mesures et d'analyses

Dans le but de déterminer la qualité physicochimique et le degré de contamination par les ETM des eaux de l'Oued Moulouya, de l'Oued Ansegmir et barrage Hassan II au niveau de la mine de Zeïda, les paramètres physicochimiques ont été étudiés et les ETM analysés.

III.1 Paramètres physicochimiques

III.1.1 Paramètres in situ

III.1.1.1 Température

La mesure de la température de l'eau avec précision est nécessaire, afin de déterminer l'état des eaux de surface. En effet celle-ci agit sur le pH, la densité, la viscosité, la solubilité des gaz dans l'eau (en particulier celles de l'oxygène et du CO₂) et sur les réactions chimiques et biochimiques (Bremond et Perrodon, 1979).

La valeur de ce paramètre est influencée par la température ambiante, mais également par les modifications naturelles ; c'est le cas de la latitude, de l'altitude, de la saison, de l'heure et du

débit et aux modifications anthropiques comme le cas des rejets des eaux usées (Rodier, 1984).

Par ailleurs, la mesure de la température de l'eau et de l'air a été effectuée, *in situ*, en utilisant une électrode intégrée dans un appareil multiparamètre de type Sens IONTM+MM110.

III.1.1.2 Potentiel d'hydrogène de l'eau (pH)

Le pH est un paramètre qui permet de mesurer l'acidité ou la basicité de l'eau; c'est-à-dire la concentration en ions d'hydrogène H⁺. De manière générale, le pH contrôle plusieurs types de réactions acide-base telles que la mesure du CO₂ et l'alcalinité. Il détermine la forme chimique sous laquelle se trouvent les éléments chimiques dans l'eau ainsi que le passage d'une forme à une autre. En effet, à des pH faibles (eaux acides), les métaux sont beaucoup plus solubles et se présentent sous une forme ionique plus toxique.

Le pH de l'eau est également influencé d'une part par les variations des paramètres du milieu (température, salinité, oxygène dissous, du taux de CO₂) (Ben Bouih, 2000), et d'autre part, il dépend de l'origine des eaux, la nature pétrographique de la roche mère du milieu traversé par les eaux et la respiration des organismes (Vivier, 1946, Ottman, 1965).

Le pH a été mesuré sur place par électrométrie en utilisant un pH-mètre portable à lecture directe de type Sens IONTM+MM110.

III.1.1.3 Conductivité

La conductivité ou les matières solides dissoutes totales (TDS) est définie comme la quantité de matières dissoutes dans l'eau. Ce paramètre permet de connaître le degré de minéralisation des eaux, et de mettre en évidence la pollution des eaux. En effet des contrastes de conductivité mesurés sur un milieu permettent de mettre en évidence des pollutions, des zones de mélange ou d'infiltration.

La conductivité dépend de la température (elle est plus importante lorsque la température est élevée) de la présence des ions, leur concentration totale, leur mobilité et de la nature géologique du terrain.

La conductivité est mesurée au niveau de toutes les stations à l'aide d'un conductimètre portable de type CRISON (CM35), selon la norme française NF T90-031, elle est exprimée en µS/cm.

III.1.1.4 Potentiel d'oxydoréduction (Eh)

La mesure du potentiel Redox ou d'oxydoréduction (Eh) dans les systèmes aquatiques permet de caractériser l'état du milieu (oxydant ou réducteur). De manière générale, un milieu est dit oxydant lorsque les concentrations d'oxygène augmentent (Eh est positif), il est réducteur quand les concentrations d'oxygène diminuent (Eh est négatif).

Dans les eaux naturelles, des comparaisons relatives de l'évolution du potentiel redox peuvent être utiles pour suivre les degrés de changement du système aquatique. Par ailleurs, le potentiel d'oxydoréduction affecte la vitesse des réactions d'altération et le développement des microorganismes. Le Eh a été mesuré à l'aide du Eh-mètre portable à lecture directe de type Sens IONTM+MM110.

III.1.1.5. Oxygène dissous

L'oxygène dissous (OD) est un paramètre par lequel on mesure la concentration du dioxygène dissous dans l'eau. Sa présence dans les eaux de surface joue un rôle prépondérant dans l'autoépuration des charges polluantes et participe à la majorité des processus chimiques et biologiques en milieu aquatique (Rodier, 1984).

La teneur en oxygène dissous varie de manière journalière et saisonnière dans les eaux naturelles selon plusieurs facteurs tels que la pression atmosphérique (l'altitude), la température de l'eau, la salinité, la pénétration de la lumière, l'agitation de l'eau et la disponibilité en nutriments. En effet, la forte présence de ces derniers dans un plan d'eau par exemple, favorise le développement de la biomasse aquatique (microorganismes) utilisant l'OD pour consommer la matière organique du milieu.

La concentration en oxygène dissous a été mesurée sur le terrain à l'aide d'un oxymètre portable de type EUTECH instrument. Les valeurs sont exprimées en mg d'O₂ par litre ou en % de saturation en oxygène.

III.1.1.6 Débit de l'oued

Les mesures des débits ont été calculées de façon approximative dans les 3 stations : ZM2, ZA1 et ZM6. La technique consiste à prendre quelques indices qui permettront la mesure du débit à savoir la profondeur, et la largeur de l'oued ainsi que la distance (longueur : L) que va parcourir un objet flottant qu'on jette à la surface d'eau. Le débit, exprimé en m³/s est ainsi calculé par la formule suivante :

$$\text{Débit} = \text{Volume}/t \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$\text{Volume} = \text{Section} \times \text{profondeur} = (\text{Longueur} \times \text{largeur} \times \text{profondeur})$$

$$\text{Débit} = (\text{Longueur} \times \text{largeur} \times \text{profondeur})/t \text{ (m}^3/\text{s)}$$

III.1.2 Paramètres au laboratoire

Les analyses au laboratoire ont concerné les huit ions majeurs, cations et anions responsables de l'acquisition de la minéralisation de la plupart des eaux naturelles. Il s'agit pour les cations du calcium, magnésium, sodium et du potassium, et pour les anions des chlorures, sulfates, nitrates et de bicarbonates. Le titre alcalimétrique ainsi que la dureté totale et les matières en suspension ont été également mesurés.

Les différentes analyses ont été effectuées au laboratoire de chimie des matériaux et de l'environnement au département de chimie à la Faculté des Sciences et technique de Marrakech, Groupe REMINEX, et au laboratoire de chimie de l'ONHYM.

III.1.2.1 Titre alcalimétrique

On distingue deux titres alcalimétriques, le titre alcalimétrique simple (TA) et le titre alcalimétrique complet (TAC).

Le titre alcalimétrique (TAC) d'une eau permet de connaître sa concentration en bicarbonates (HCO_3^{2-}) autrement dit son alcalinité. Cependant, Quand le pH augmente, les bicarbonates se transforment en carbonates. Ce dernier dépend de l'équilibre du pH et de la pression du CO_2 (Nelson, 1959).

Le titre alcalimétrique a été dosé en neutralisant les ions hydroxydes et transformation des ions bicarbonates en hydrogénocarbonates par l'acide sulfurique (H_2SO_4 à 0,02N) en présence de phénolphtaléine (pour le TA) et de méthyle orange (pour le TAC) comme indicateur coloré (Selon la norme AFNOR T90-036).

III.1.2.2 sulfates

La présence des sulfates dans l'eau peut être d'origine naturelle liée à la dissolution du gypse, au lessivage des terrains pyrifères ou à l'oxydation des sulfures (Bakalowicz, 1974), ou d'origine anthropique en relation avec une pollution industrielle ou urbaine (Miserez, 1973).

Le dosage du sulfate a été effectué selon la méthode néphélométrique (Rodier, 1984), par précipitation de ce dernier en milieu chlorhydrique à l'état de sulfate de Baryum. Le précipité ainsi obtenu est stabilisé à l'aide d'une solution de Tween. Les suspensions

homogènes sont mesurées au spectrophotomètre à 650 nm. Les résultats sont exprimés en mg/l.

III.1.2.3 Chlorures

Les chlorures sont des éléments chimiques qui se présentent dans tous les types d'eau. Leurs teneurs dans l'eau dépendent fortement de l'origine et de la nature du terrain. Ils contribuent à la conductibilité électrique des cours d'eaux.

Les Chlorures ont été évalués par volumétrie de Mohr. Par une solution de nitrate d'argent en présence de chromate de potassium comme indicateur coloré. Les AgCl précipitent tant qu'il y a des Cl^- , la fin du dosage est détectée par l'apparition d'une couleur rouge.

III.1.2.4 Nitrates

Les nitrates sont présents à l'état naturel dans l'eau suite à l'oxydation de la matière organique par les microorganismes. Mais ils sont aussi apportés de manière synthétique par les engrais (Chapman et al, 1996). Ils sont l'une des causes de la dégradation de l'eau.

La concentration en nitrate dans les eaux est déterminée à l'aide d'un calorimètre. Selon la méthode 8039 décrite dans le manuel de l'appareil, par l'introduction de l'échantillon d'eau, mélangé avec une poudre spécifique aux nitrates, dans l'appareil de mesure et après une certaine durée (5 minutes), les concentrations en nitrates sont données automatiquement en mg/l.

III.1.2.5 Dureté totale

La dureté totale regroupe les quantités dissoutes des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} . Des valeurs relativement élevées, supérieures à 50°F (degrés français) indiquent une pollution chimique du milieu aquatique. La dureté totale influence également la toxicité et la bioaccumulation des métaux lourds en favorisant la formation des carbonates insolubles qui sous l'effet compétitif des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} avec les métaux diminuent l'incorporation de ces derniers aux organismes (Bell, 1976).

Le dosage se fait à l'E.D.T.A. (N/50) en présence d'une solution tampon pour amener le pH de l'échantillon à 10. L'indicateur coloré (Noir d'Erichrome T) a la propriété de faire avec les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} un complexe de type chélate. La disparition des dernières traces d'éléments libres à doser est décelée par le changement de la couleur de l'indicateur qui passe du violet au bleu franc. Les résultats sont exprimés en mg/l.

III.1.2.6 Calcium

La présence de sels de calcium dans l'eau est l'un des facteurs qui contribuent au caractère entartrant de l'eau. Sa concentration dans l'eau dépend du temps de séjour de l'eau dans des formations géologiques riches en calcium.

La dureté calcique a été effectuée par complexométrie (E.D.T.A). Le dosage du calcium se fait en présence de la soude caustique à 33% et l'indicateur coloré (Murexide), puis on titre par l'E.D.T.A. Les résultats sont exprimés en mg/l.

III.1.2.7 Magnésium

Le magnésium est un élément chimique d'origine naturelle (dissolution des roches, magnésites, basaltes, argiles) ou industrielle (industrie de potasse, de la cellulose, traitements de surface, brasserie). Dans les eaux douce, les concentrations en Mg^{2+} sont inférieures à celles du Ca^{2+} (Gaujous, 1995).

La concentration des ions magnésium est obtenue par différence entre la dureté totale et la dureté calcique.

III.1.2.8 Ions Sodium et Potassium Ces ions ont été dosés à l'aide d'un spectrophotomètre de flamme (PFP7). Cette méthode est basée sur le fait qu'un sel métallique passé dans une flamme s'ionise et émet une lumière de longueur d'onde caractéristique. Connaissant la longueur d'onde du sodium et du potassium, les concentrations en ces deux éléments sont mesurées automatiquement.

III.1.2.9 Matière en suspension (MES)

La matière en suspension représente l'ensemble des particules minérales et organiques contenus dans les eaux. Elle peut provenir soit à partir des sources naturelles (phénomènes d'érosion, du lessivage et du ruissellement), qui dépendent de la nature des terrains traversés, de la saison, de la pluviométrie, de régime d'écoulement d'eau (Rodier, 1984), Soit issues de sources anthropiques (rejets d'eaux résiduaires urbaines ou industrielles).

Les teneurs élevées en MES, peuvent être considérées comme une forme de pollution pour les milieux aquatiques, en modifiant la turbidité des eaux, réduisant la transparence de la lumière et donc la photosynthèse. Ainsi, les MES peuvent être un véhicule pour les polluants toxiques présents sous formes dissoutes (Ouillon, 1998). L'estimation de leur teneur dans les eaux n'est pas nécessairement corrélée avec celle du débit.

La détermination des MES est obtenue par filtration d'un volume d'échantillon d'eau (100ml) sur des filtres de 0.45µm. Par la suite, les filtres ont été séchés à la température ambiante dans des boîtes de pétri mis sur une étagère à l'abri de la poussière. La mesure de la teneur est établie par la différence entre le poids du filtre avant et après la filtration. Pour la dernière mesure, le filtre doit être sec. En tenant compte du volume filtré pour chaque filtre, le résultat peut être finalement exprimé en mg/l de MES.

III.2 Dosage des ETM

Les éléments traces ont été aussi dosés pour les deux compagnes. Chez REMINEX et Laboratoire de chimie minérale de L'ONHYM, respectivement pour les échantillons de Février, Juin.

Les analyses de ces éléments traces ont été effectuées pour la phase dissoute récupérés lors de la filtration d'eau (<0,45). La méthode analytique adoptée est l'ICP-AES ou OES (spectrométrie d'émission atomique (ouoptique) couplée au plasma d'Argon) (Jarvis et Jarvis, 1992), Cette méthode est fondée sur les transitions des électrons situés sur les couches extérieures de l'atome ; soit entre les états excités et l'état fondamental, soit entre plusieurs états excités. On observe, suivant les transitions effectuées, des raies atomiques et ioniques. L'apparition ou disparition de certaines raies permettent une analyse qualitative. Alors que l'intensité de certaines raies dans un échantillon en comparaison avec celles d'étalons choisis permet une analyse quantitative. La source d'excitation est un plasma d'Argon (6000-10000° K) qui est un gaz ionisé macroscopiquement neutre et optiquement transparent. Cette source d'émission a pour rôle d'abord l'atomisation de l'échantillon afin d'obtenir des atomes libres puis l'excitation de ces derniers dans des états d'excitation plus élevés. Les raies obtenues sont mesurés dans un spectromètre optique dans la plupart du temps combiné comprenant un système séquentiel monochromateur et un système simultané polychromateur (Moore, 1989 ; Thompson et Walsh, 1989 ; Jarvis et Jarvis, 1992).



CHAPITRE III: Résultats et discussions

I. Contrôle de la cohérence des analyses

Avant d'interpréter les résultats des analyses obtenus, une mesure du bilan ionique est nécessaire afin de vérifier la fiabilité des analyses. Généralement ce bilan doit contrôler le fait que la somme de concentrations équivalentes des anions doit compenser celle des cations.

Le calcul de la balance ionique est basé sur la relation établie par FREEZE & CHERRY en 1979 in CURIE, 2006:

$$Bi = \frac{\sum cations - \sum anions}{\sum cations + \sum anions} \times 100 \text{ Avec } \sum cations - \sum anions \text{ exprimés en méq/l}$$

Si on veut interpréter des bases de données hydrochimiques au niveau du secteur étudié, il faut que la balance ionique mesurée au niveau de chaque station reste en dessous d'un seuil raisonnable. Généralement, la limite pour une analyse exploitable est fixée à un écart maximum de 10% entre cations et anions.

Les résultats de deux stations (ZM4, ZAn1) en première campagne, et les résultats pour les stations (ZM1, ZM4, ZM5, ZB1, ZB2) en deuxième campagne sont inférieurs à cette limite (Tab.3). Par contre, les résultats au niveau des autres stations dépassent le seuil de 10%.

Il s'avère souvent que ce seuil élimine un nombre significatif de résultats d'analyses. Dans notre cas, le traitement des résultats est réalisé tout en supposant que d'autres paramètres contribuant significativement au bilan ionique n'ont pas été mesurés.

Tableau 3 : Résultats de calcul de la balance ionique (en %) pour les échantillons d'eau de chaque station.

stations	Balance ionique (%)	
	période de pluie	période sèche
ZM1	-22,38	-3,99
ZM2	-37,68	14,61
ZM3	-21,02	13,41
ZM4	-4,72	9,06
ZM5	-30,35	6,24
ZM6	-19,31	-12,86
ZAn1	-6,36	-12,68
ZAn2	-39,17	-23,97
ZB1	-16,84	-10,79
ZB2	-12,41	-1,47

II. Paramètres mesurés in-situ

II.1 Température

La Température de l'eau mesurée tout au long de l'oued Moulouya montre une variation spatiotemporelle (Fig. 24). En effet, les valeurs de température mesurée oscillent entre 7,8°C (ZM1) et 14,8°C (ZAn2) avec une moyenne de 11,19°C pendant la saison humide, alors qu'elles varient entre 18°C (ZB1) et 24,2°C (ZAn1) avec une moyenne de 20,46°C pendant la saison sèche. Les températures les plus basses sont enregistrées durant la saison humide, alors que le maximum de température est enregistré pendant la saison sèche. L'amplitude de la variation entre les deux campagnes atteint 30°C. Les valeurs de températures mesurées et les variations saisonnières sont influencées par les conditions climatiques et notamment la température de l'atmosphère ayant régnés dans la région au moment des prélèvements. Quant aux variations spatiales ne montrant pas de différences significative d'une station à l'autre, elles sont dues au fait que les prélèvements sont effectués avec un décalage horaire journalier entre les différentes stations.

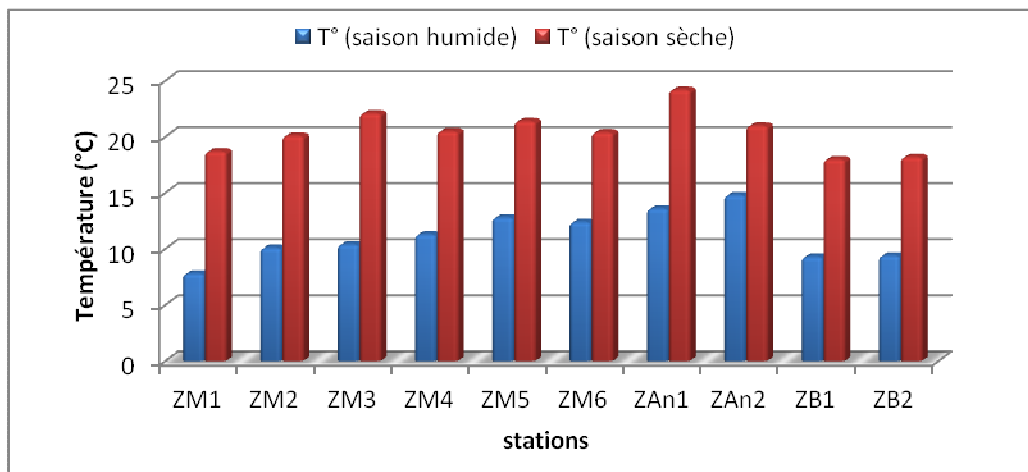


Figure 24 : variation spatio-temporelle de la température

II.2 potentiel d'hydrogène (pH)

Les valeurs de pH mesuré varient en moyenne entre 8,11 en période hivernale et 8 en période sèche (Fig. 25). Les variations du pH sont faibles d'une station à l'autre et d'une saison à l'autre, elles ne dépassent pas une unité de pH. Le pH des eaux de la retenue du Barrage Hassan II peut être qualifié comme neutre avec une tendance alcaline pour les deux campagnes. Une légère augmentation du pH pendant la saison humide est observée au niveau de l'oued Moulouya, alors qu'une légère diminution du pH est observée pendant la même période au niveau du barrage. La tendance à la neutralité des eaux du barrage pendant la saison humide peut être expliquée par la dilution des eaux du barrage suite aux apports en

eaux en période humide à l'inverse l'évaporation en saison sèche favorise la concentration des éléments et par conséquent l'augmentation du pH.

La tendance à l'alcalinité des eaux de la Haute Moulouya pourrait avoir une relation avec la géologie de la région. En effet, au niveau de la Haute Moulouya, les eaux de ruissellement traversent des terrains à dominance calcaire et marno-dolomitique non végétalisés et les résidus de traitement nus riches en minéraux carbonatés avant d'arriver à l'oued Moulouya. En outre, les phénomènes de drainage minier acide pouvant générer des eaux acides minières sont absents dans la zone d'étude (EL Hachimi et al. 2005),

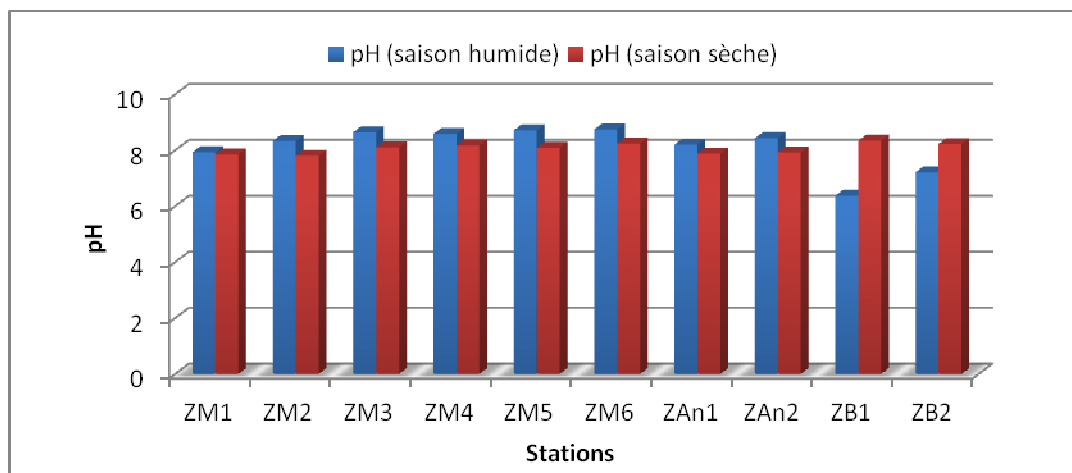


Figure 25 : variation spatio-temporelle de pH

II.3 Conductivité électrique

Les valeurs de la conductivité des eaux de l'oued Moulouya sont généralement modérées en saison humide (avec une moyenne de 645 μ s/cm) alors qu'elles sont excessivement élevées pendant la saison sèche (fortes valeurs ont été observés 1456 μ s/cm) (Fig.26). Ceci pourrait être expliqué par la dilution des eaux durant la saison humide. L'augmentation de la température pendant la saison sèche favorise l'évaporation, et provoque l'augmentation de la concentration des ions dissous et donc l'augmentation de la conductivité.

L'augmentation de la conductivité électrique est remarquée au niveau des stations situées près de la mine de Zeïda. La diminution est remarquée au niveau de l'oued Ansegmir et les stations du barrage Hassan II loin de la mine.

Les fortes conductivités enregistrée au niveau des stations situées au voisinage de la mine, pourrait être due à l'influence des résidus miniers de traitement, situés sur les deux rives de l'oued Moulouya, suite au lessivage et au ruissellement de ces résidus miniers en saison

humide et au transport aérien des éléments minéraux suite au vents forts régnant dans la région en saison sèche.

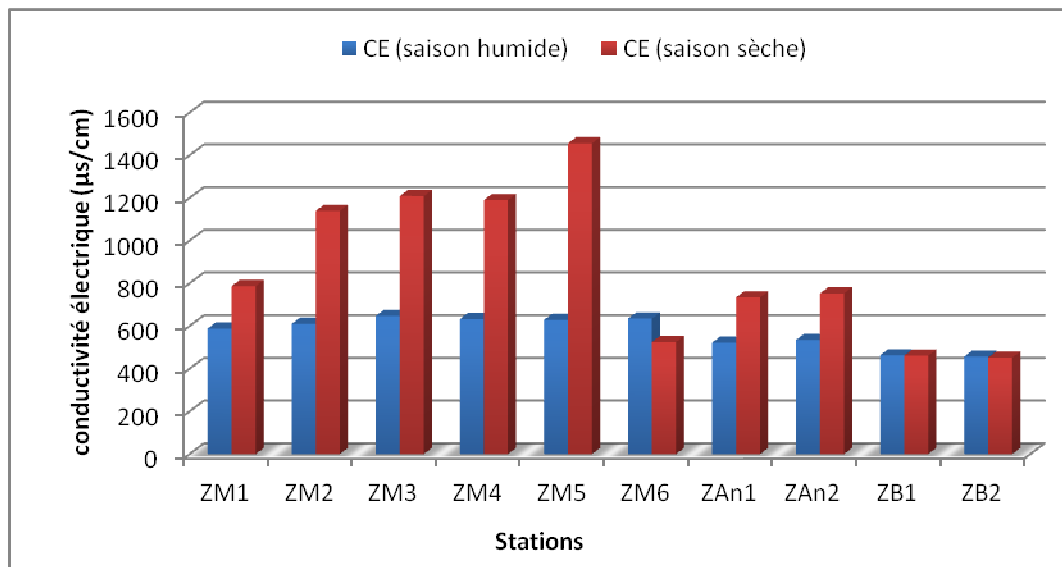


Figure 26 : variation spatio-temporelle de conductivité électrique

II.4 Oxygène dissous

Les résultats des mesures spatiotemporels de l’oxygène dissous dans l’eau (Fig. 27), révèlent que les eaux de la retenue du barrage sont généralement bien oxygénées. Les valeurs mesurées sur le réseau s’échelonnent entre 6,3 mg/l (ZB1) et 8,82 mg/l (ZM4), et entre 5,63 mg/l (ZAn1) et 9,81 mg/l (ZM4) respectivement en saison humide et en saison sèche.

Selon Hébert et Légaré (2000), une eau froide contient une plus grande quantité d’oxygène dissous qu’une eau chaude, en plus les fortes vitesses des vents engendrent un brassage continu de la masse d’eau et par conséquent un enrichissement de la phase dissoute en oxygène dissous pendant la saison humide. Il s’agit du cas des stations ZM1, ZM5, ZAn1, ZAn2, ZB2. Alors que pour les autres stations, l’évolution saisonnière de l’oxygène dissous montre des concentrations plus élevées en période sèche que celles en période de pluie. Ces teneurs en oxygène dissous sont liées à l’influence des autres facteurs autres que la température. En effet, les conditions de ces stations sont caractérisées par un éclaircissement suffisant et une biodisponibilité des nutriments ainsi que l’abondance des phytoplanctons responsables de l’accumulation d’oxygène dissous produit par la photosynthèse.

Selon la grille de qualité des eaux de surface (Normes marocaines) (B.O N° 5062 du 5.12.2002), et tenant compte des concentrations en oxygène mesurées dans les eaux de la

retenu du Barrage Hassan II et de l'oued Moulouya, montrent que ces eaux peuvent être classées dans la catégorie des eaux de bonne qualité.

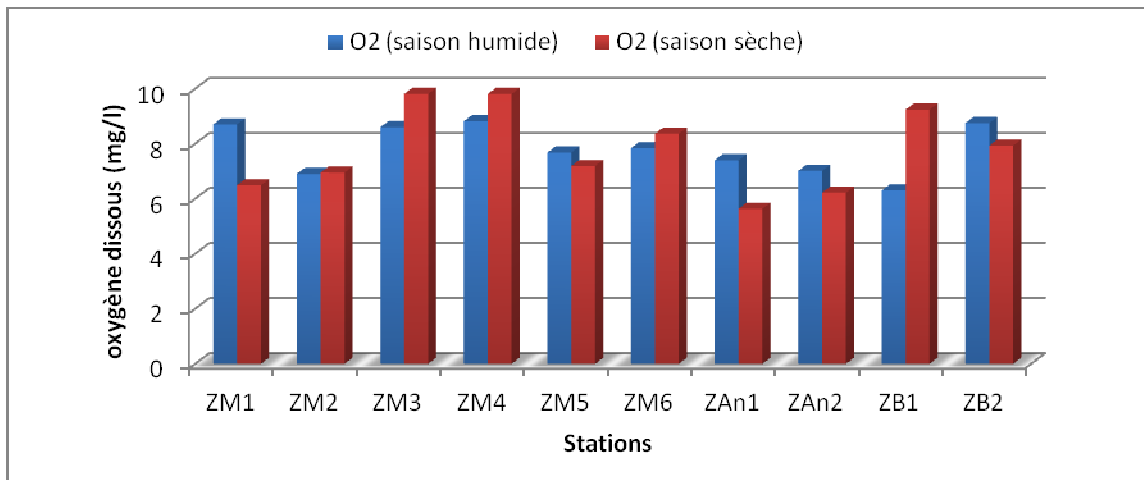


Figure 27 : variation spatio-temporelle de l'oxygène dissous

II. 5 Potentiel d'oxydoréduction

Les résultats de mesures du potentiel d'oxydoréduction (Fig. 28) montrent une légère variation entre les différentes stations et entre les deux compagnes. La valeur maximale est de 173mv (ZB2/saison humide) et la valeur minimum est de 63mv (ZB1/saison humide).

Ces résultats révèlent que le milieu (eau courante) est bien aéré, et que les conditions écologiques sont favorables à l'oxydation. La faible valeur enregistrée dans la station du Barrage ZB1 (eaux stagnante) indique l'existence de facteurs réducteurs.

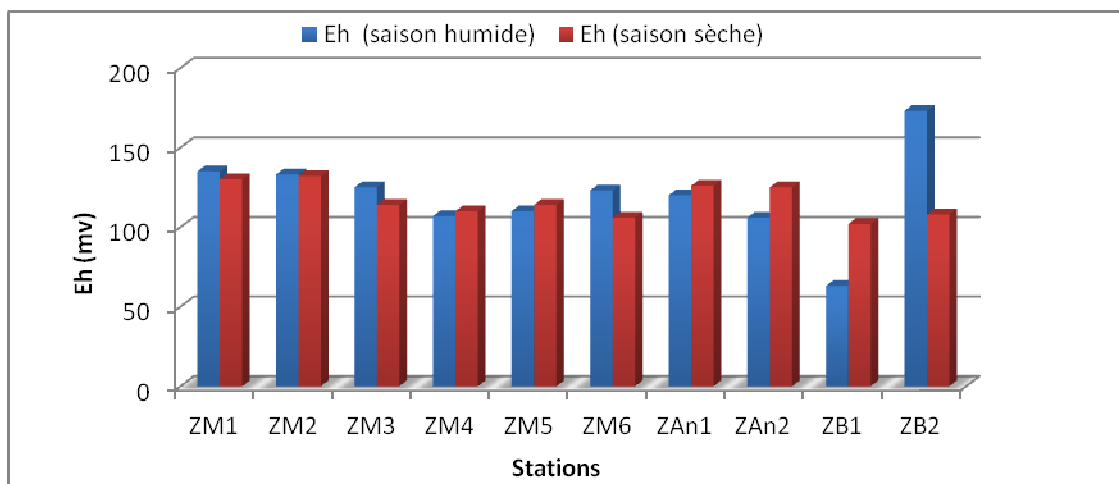


Figure 28 : variation spatio-temporelle du potentiel d'oxydoréduction

III. Paramètres mesurés au laboratoire

III.1 Matières en suspension

Les valeurs mesurées de la matière en suspension (MES) (Fig. 29) oscillent entre 5.3mg/l (ZM'1) et 36.7mg/l (ZM4) avec une moyenne de 19mg/l. Les variations spatiales de ce paramètre montrent des écarts entre les stations situées en amont, en aval et au niveau du district minier Zeïda. Les fortes valeurs sont rencontrées au niveau des stations situées en aval des résidus miniers qui par la suite, diminuent immédiatement dans les stations du barrage Hassan II. La comparaison de ces valeurs avec celles obtenues pour la même période (hivernale) par El Hachimi, 2006, montre une variation importante.

D'après l'étude réalisée par El Hachimi (2006), les teneurs en MES dans les eaux de l'oued Moulouya dépassent en période de pluie la norme marocaine. Par contre, dans le cas de la présente étude les valeurs en MES sont très faibles, ceci peut être expliqué, par l'absence des fortes précipitations lors des prélèvements des échantillons, qui peut occasionner une augmentation des matières en suspensions.

Donc, on peut lier les quantités de matières particulaires dans les eaux au niveau du centre minier et en aval au lessivage et à l'érosion éolienne et au transport que peuvent subir les résidus miniers de traitement abandonnés non végétalisés vers les ressources en eaux avoisinantes.

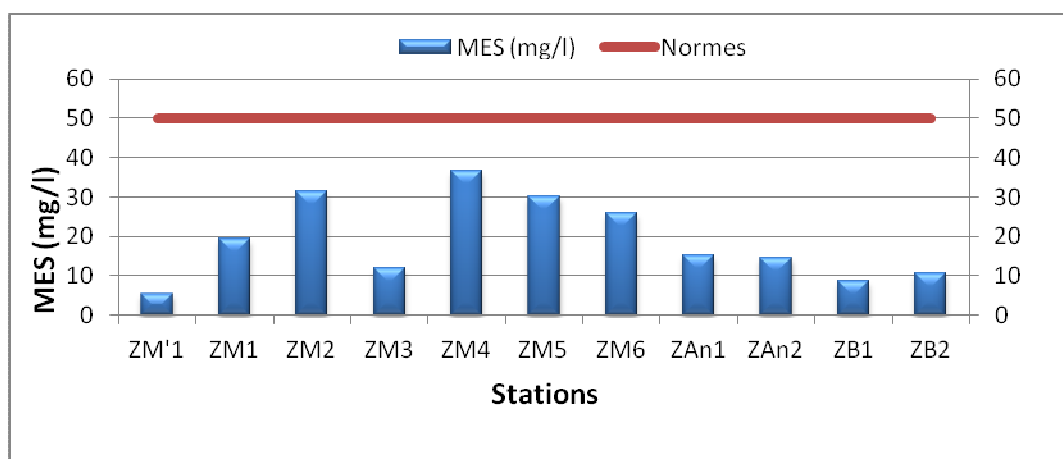


Figure 29 : variation spatio-temporelle de la matière en suspension

III.2 Les éléments majeurs

Dans l'ensemble des différents échantillons prélevés au niveau des stations de l'oued Moulouya, les teneurs en ions calcium sont homogènes dans presque la totalité de la zone étudiée (Fig.30). Seul au niveau de la station ZM1 où les valeurs sont les plus élevées. La concentration en Ca^{2+} est liée directement à la nature géologique des terrains traversés par les eaux, suite à l'attaque par l'eau chargée de dioxyde de carbone, les roches calcaires ou de la simple dissolution des gypses.

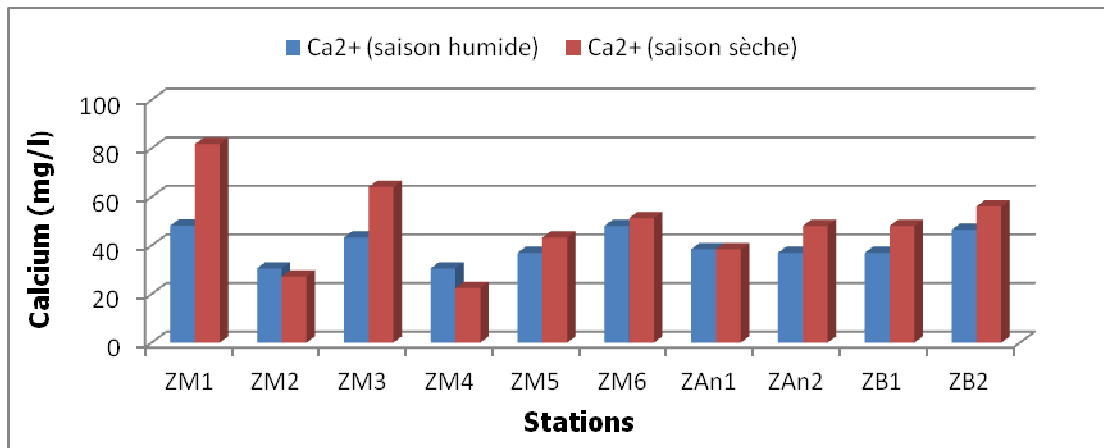


Figure 30 : Variation spatiotemporelle du calcium dans les eaux (mg/l).

Les concentrations en magnésium (Fig. 31) sont comprises entre quelques mg/l (12mg/l) et plusieurs centaines de mg/l (123mg/l) respectivement au niveau des stations loin et à proximité de la mine. Cette importante variabilité montre l'effet des résidus miniers riches en dolomites. Les fortes concentrations sont observées plus particulièrement en saison sèche. De même, on note que, dans l'ensemble de la zone étudiée, la dureté magnésique est beaucoup plus importante que la dureté calcique, à l'exception des stations du barrage.

L'enrichissement en magnésium plus qu'en calcium est dû à la forte solubilité du premier élément (Dussart, 1966). Selon D. Sokolov 1962, la teneur élevée en CaSO_4 dans la solution provoque inévitablement le changement du taux de la solubilité de la calcite et de la dolomite, car il est incontestable que la solubilité de la calcite diminue dans la solution de CaSO_4 .

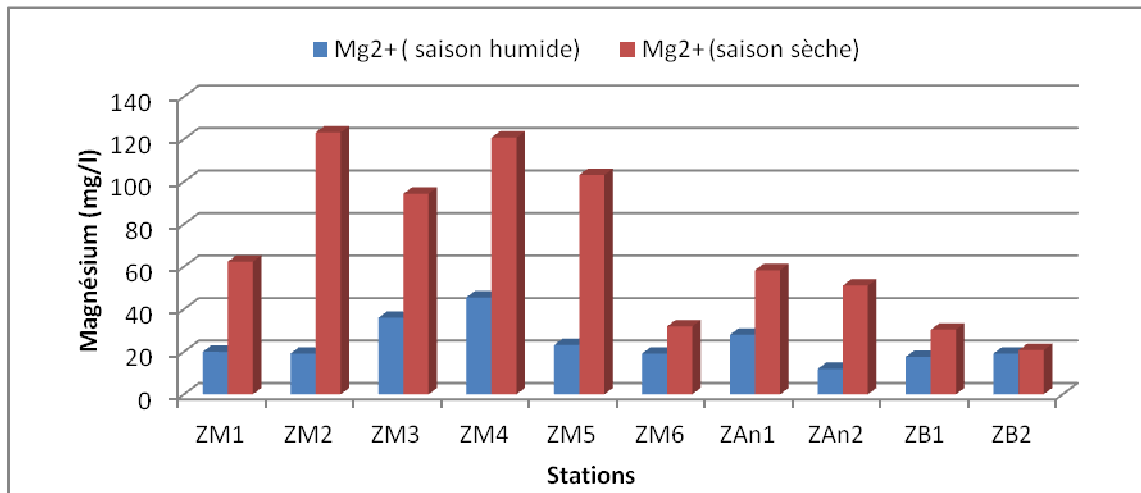


Figure 31 : Variation spatiotemporelle du magnésium dans les eaux (mg/l).

Les teneurs en SO_4^{2-} (Fig.32) sont largement variables d'une station à l'autre, allant de 26 mg/l (ZM6) à 88 mg/l (ZM2). La présence des sulfates dans l'eau peut être liée à la dissolution de gypse, ou à l'oxydation des sulfures (BAKALOWICZ, 1974). Ainsi le rapport $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ montre des valeurs proche à 1. Cela montre que ces deux éléments ont la même origine. Il s'agit de la dissolution du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

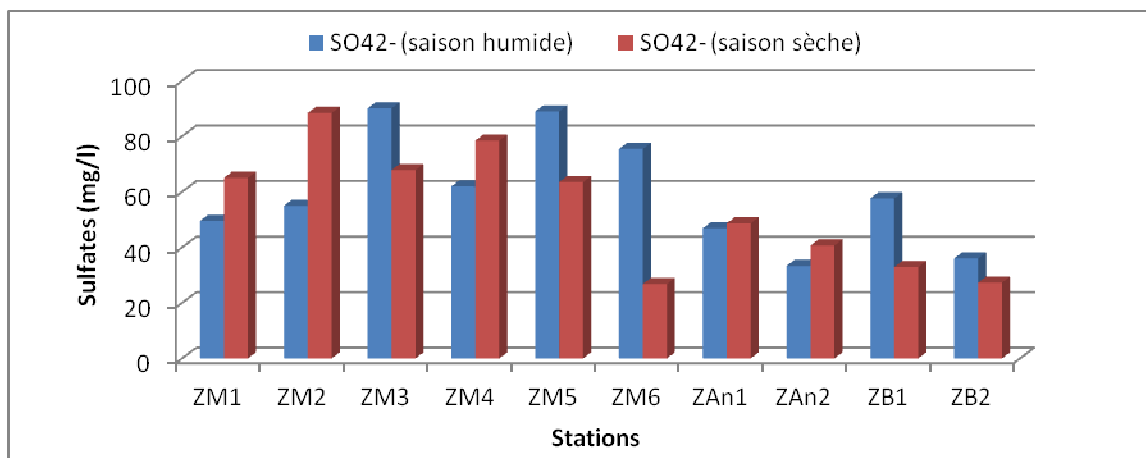


Figure 32 : Variation spatiotemporelle des sulfates dans les eaux (mg/l).

Les concentrations en ions Na^+ et K^+ (Fig. 33 et 34) présentent des fluctuations presque similaires, avec des valeurs minimales enregistrées dans la partie amont de la mine de Zeida, tandis que les valeurs maximales sont observées au niveau des stations ZM2, ZM3, ZM4, localisées respectivement en aval des résidus. Ces deux éléments proviennent essentiellement de micas et de feldspathoïdes formant les roches minéralisées d'arkose, ayant

subit le broyage et le traitement pour l'extraction du plomb, dont les éléments sont présents dans les résidus.

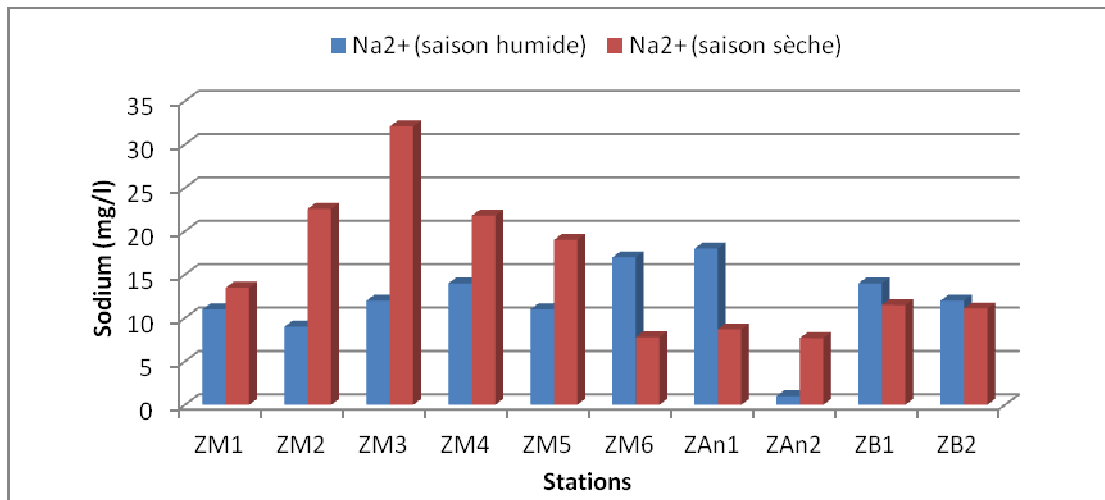


Figure 33 : Variation spatiotemporelle du sodium dans les eaux (mg/l).

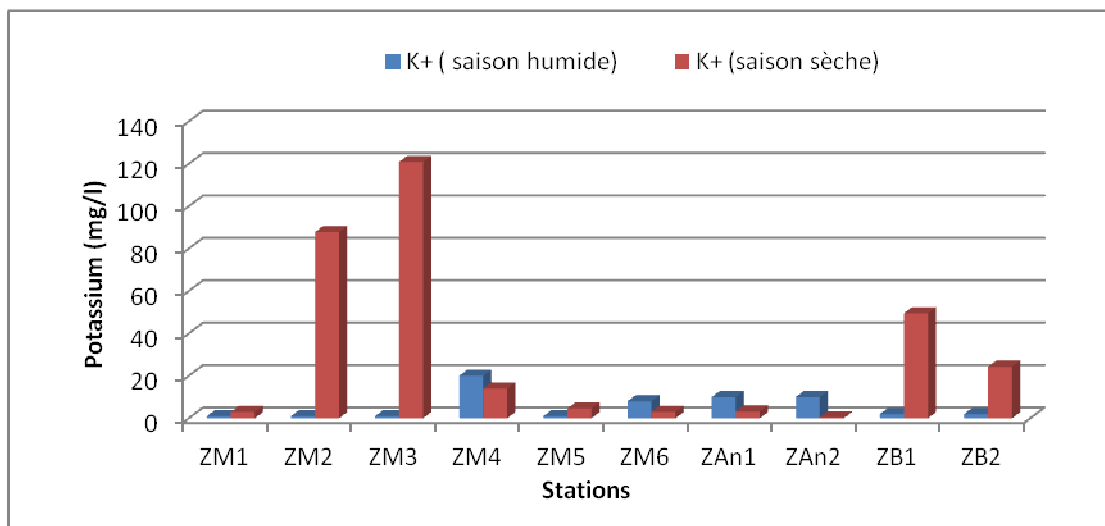


Figure 34 : Variation spatiotemporelle du potassium dans les eaux (mg/l).

Les teneurs en chlorures (Fig.35) varient d'une station à l'autre. Ils sont liés aux roches évaporitiques dans la région marquant la série triasique.

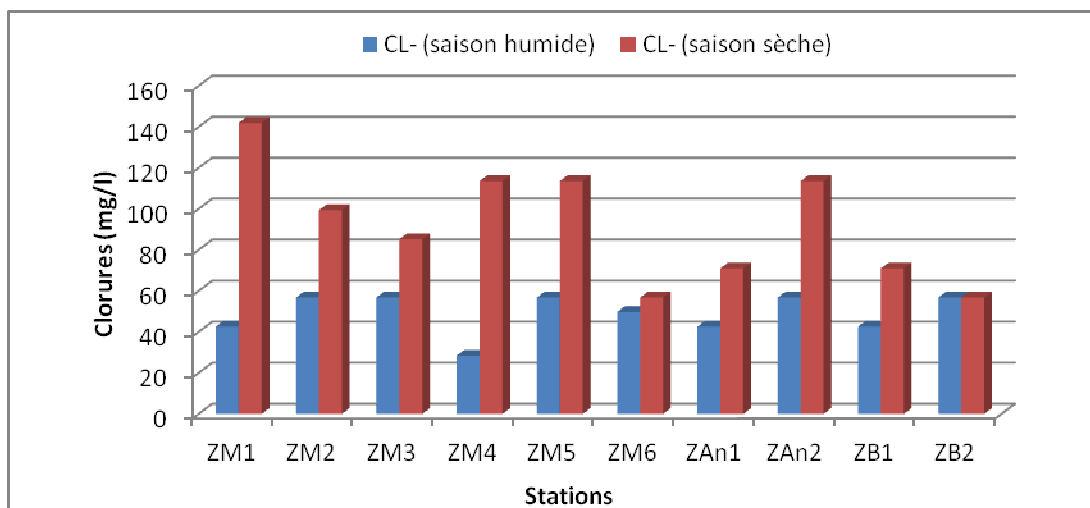


Figure 35 : Variation spatiotemporelle des chlorures dans les eaux (mg/l).

Les concentrations en nitrates (Fig.36) ne suivent pas ces cycles. Elles varient selon un cycle différent et moins marqué pour lequel on ne dispose pas d'assez de recul pour avancer une interprétation.

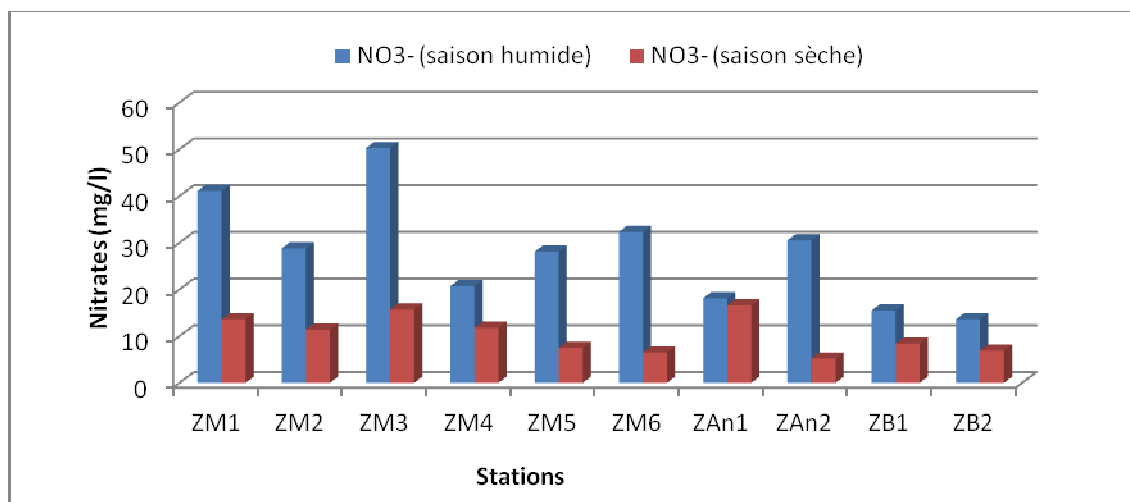


Figure 36 : Variation spatiotemporelle des nitrates dans les eaux (mg/l).

Les teneurs moyennes en bicarbonates sont très élevées dans la majorité des stations (Fig.37). La source principale de ces teneurs est liée à des interactions eau/roche. En effet, le système carbonaté en milieu aquatique joue un rôle important dans les réactions de dissolution et de précipitation des carbonates. L'eau s'équilibre à la fois avec le CO₂ gazeux qui se dissout, et avec le CaCO₃ solide des roches (Sigg et al, 2006).

Le CO₂, en présence d'une phase gazeuse (atmosphère ou rhizosphère), peut se dissoudre dans l'eau. Après hydratation et ionisation, le CO₂ donne lieu à un produit acide qui permet l'attaque du CaCO₃ présent dans toutes les roches sédimentaires et se chargent en davantage en ions. La réaction de base, qui illustre ces possibilités de réactions, peut s'écrire

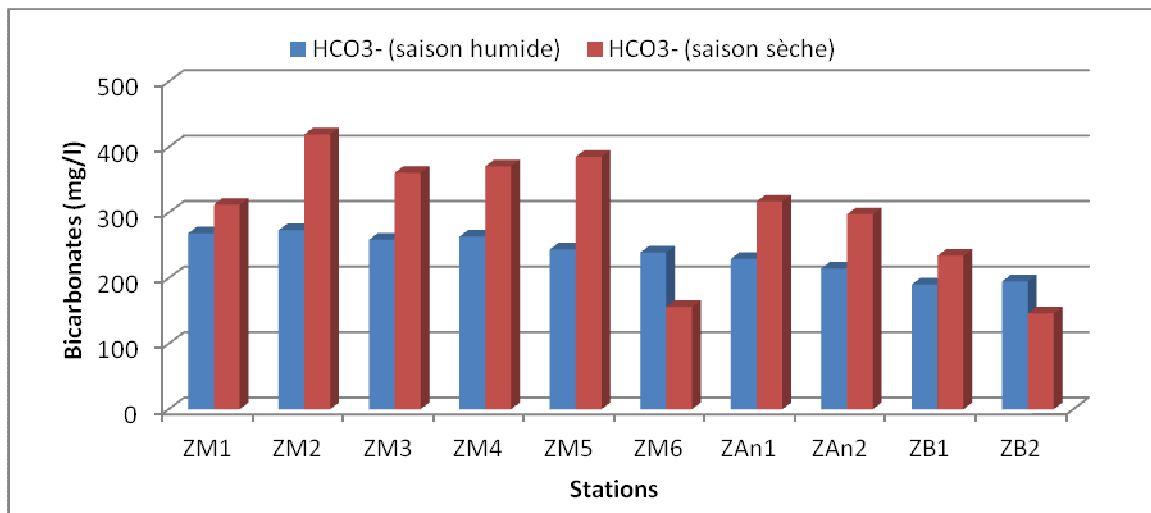
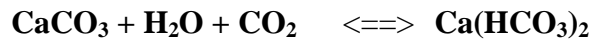


Figure 37 : Variation spatiotemporelle des bicarbonates dans les eaux (mg/l).

III.3 Eléments traces métalliques

Les résultats du suivi de l'évolution spatio-temporel des éléments traces métallique dans les échantillons d'eau filtrés (dépourvues de la MES), prélevés au niveau des différentes stations de l'oued Moulouya et du barrage Hassan II, en amont, au voisinage et en aval de la mine de Zeïda, montrent globalement des valeurs de concentration en ETM soit très faibles soit inférieures à des limites de détection de l'appareil utilisée pour les analyses et ne présentent pas une variabilité entre les stations (Tab.4). Les variations des concentrations des ETM entre les différentes stations, ainsi que, les variations saisonnières ne peuvent être discutés.

Dans l'eau, les ETM peuvent être adsorbés ou complexés c.-à-d. liés à la fraction colloïdale minérale et organique (Fig.3). Le transfert des ETM sous forme dissoute est ainsi limité en quantité. La filtration des échantillons d'eau avant analyse suite aux exigences de l'appareil donne lieu à la soustraction (élimination sur les filtres) d'une quantité d'ETM qui ne faisant pas l'objet d'analyses.

En effet, les analyses effectuées sur les sédiments prélevés en même moment que les échantillons des eaux et dans les mêmes stations ont révélé des teneurs très élevées en ETM dans les sédiments de toutes les stations dépassant de très loin les valeurs normales pour les sédiments. Ceci signifie que lorsque les eaux de la région deviennent de plus en plus basique, moins il y a d'éléments trace dans la phase dissoute.

Ces résultats soulignent l'influence plus ou moins importante des paramètres physico-chimiques de l'eau dans la distribution des ETM dans l'oued Moulouya.

Tableau 4: Concentrations en ETM ($\mu\text{g/l}$) dans les eaux de surfaces (phase dissoute) au voisinage de la mine Zeïda

Stations	Période de pluie (février, 2013)					Période sèche (Juin, 2013)				
	As $\mu\text{g/l}$	Cd $\mu\text{g/l}$	Cu $\mu\text{g/l}$	Pb $\mu\text{g/l}$	Zn $\mu\text{g/l}$	As $\mu\text{g/l}$	Cd $\mu\text{g/l}$	Cu $\mu\text{g/l}$	Pb $\mu\text{g/l}$	Zn $\mu\text{g/l}$
ZM1	<50	<4	60	20	80	<0,8	<0,2	<0,2	<0,4	<0,2
ZM2	<50	<4	50	20	<50	<0,8	<0,2	<0,2	<0,4	<0,2
ZM3	<50	<4	50	20	<50	<0,8	<0,2	<0,2	<0,4	<0,2
ZM4	<50	<4	50	20	<50	<0,8	<0,2	<0,2	<0,4	<0,2
ZM5	<50	<4	50	20	<50	<0,8	<0,2	<0,2	<0,4	<0,2
ZM6	<50	<4	50	20	<50	<0,8	<0,2	<0,2	<0,4	<0,2
ZAn1	<50	<4	40	20	<50	<0,8	<0,2	<0,2	<0,4	<0,2
ZAn2	<50	<4	40	20	<50	<0,8	<0,2	<0,2	<0,4	<0,2
ZB1	<50	<4	40	20	<50	<0,8	<0,2	<0,2	<0,4	<0,2
ZB2	<50	<4	40	20	<50	<0,8	<0,2	<0,2	<0,4	<0,2

IV. Faciès chimiques des eaux

En vue d'identifier les faciès chimiques et de matérialiser l'évolution spatial et temporel de l'hydrochimie des eaux d'oued Moulouya et des eaux de la retenue du barrage Hassan II durant les deux saisons (Humide/Sèche), différents diagrammes, tels que le diagramme Scholler-Berkaloff et le diagramme de Piper basés sur les concentrations équivalentes (en méq/L) ont été tracés sur la base des résultats des analyses effectuées.

IV.1 Diagramme de Piper

Le diagramme triangulaire de Piper permet de statuer sur le faciès chimique des eaux selon une classification en quatre familles : chlorurée sulfatée calcique et magnésienne, chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique, bi/carbonatée sodique et potassique, puis bi/carbonatée calcique et magnésienne. Il est composé de deux triangles représentant la répartition des anions et celle des cations, la position d'un résultat sur chacun de ces deux triangles permet de préciser en premier lieu la dominance anionique et cationique. A ces deux

triangles un losange est associé sur lequel est reportée l'intersection des deux triangles, définissant la répartition synthétique des ions majeurs.

À partir du diagramme de piper (Fig. 38, 39), nous remarquons que les eaux de l'oued Moulouya et du barrage Hassan II appartiennent principalement à un faciès bicarbonaté calcique et magnésien dans les deux campagnes effectuées aux mois de Février et de Juin. Un enrichissement en ions calcium et magnésium a été constaté en période sèche et probablement lié à l'évaporation favorisant la concentration de ces éléments dans le milieu. Les eaux de l'oued Moulouya ont des faciès chimiques homogènes, avec une faible variation de l'amont vers l'aval de la mine de Zeïda. Cela peut être lié avec la faible influence des apports en eau des affluents de l'oued Moulouya se déversant dans le barrage Hassan II.

Par ailleurs, les anions bicarbonates sont présents dans la totalité des stations représentés sur le triangle des anions, traduisant l'origine de ces eaux. D'une manière générale, le faciès rencontré au niveau de l'oued Moulouya est contrôlé essentiellement par la dissolution des roches carbonatées (Calcaires, marmo- dolomitique) qui affleurent dans la région, ainsi que l'influence des résidus de traitement riches en bicarbonates.

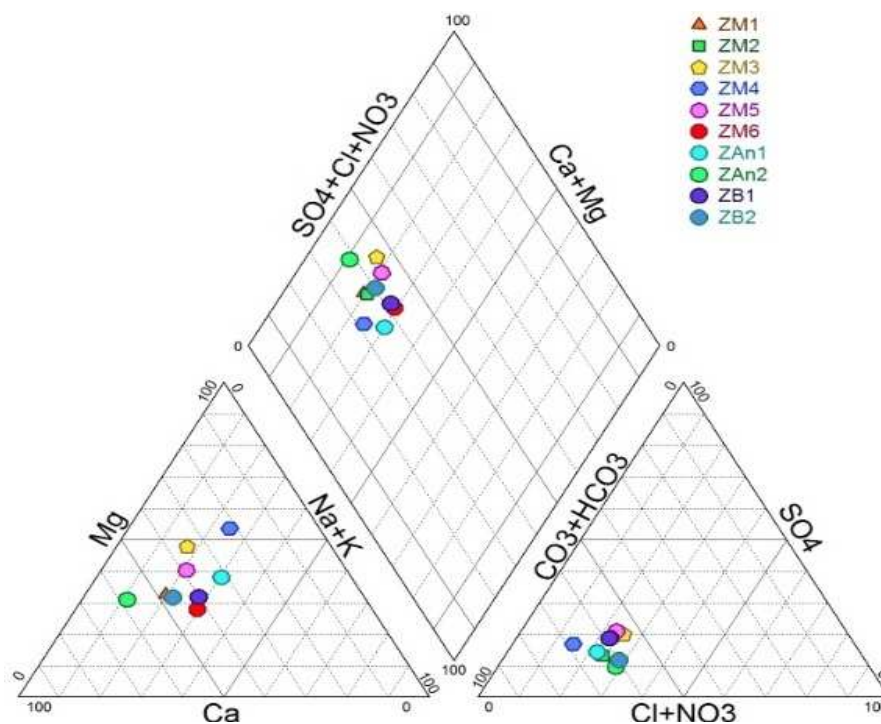


Figure 38: Faciès chimique de l'oued Moulouya et du barrage Hassan II (Février, 2013)

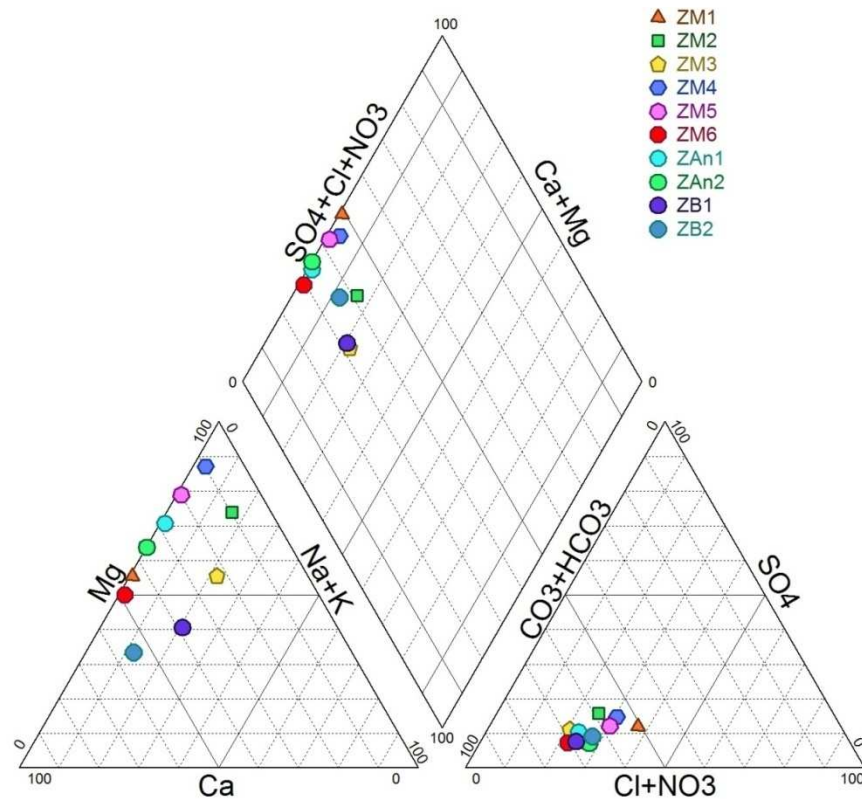


Figure 39 : Faciès chimique de l'oued Moulouya et du barrage Hassan II (Juin, 2013)

IV.2 Diagramme de Shoeller-Berkaloff

Afin de mettre en évidence les familles chimiques, les différents faciès chimique et les variations des teneurs entre les stations pour des eaux de l'oued Moulouya et les eaux du barrage Hassan II, le diagramme de schoeller-Berkaloff a été tracé tout en portant sur un papier semi logarithmique les valeurs mesurées des éléments majeurs pour chaque point de prélèvement d'eau (Fig. 40, 41).

À première vue, on remarque que toutes les stations présentent le même type de minéralisation, avec dominance des bicarbonates, calcium et magnésium, notamment en été. Ces fortes valeurs pourraient être expliquées par l'influence de la géologie au niveau du bassin versant suite aux réactions chimiques des eaux avec les roches en affleurement et même avec celles en profondeur.

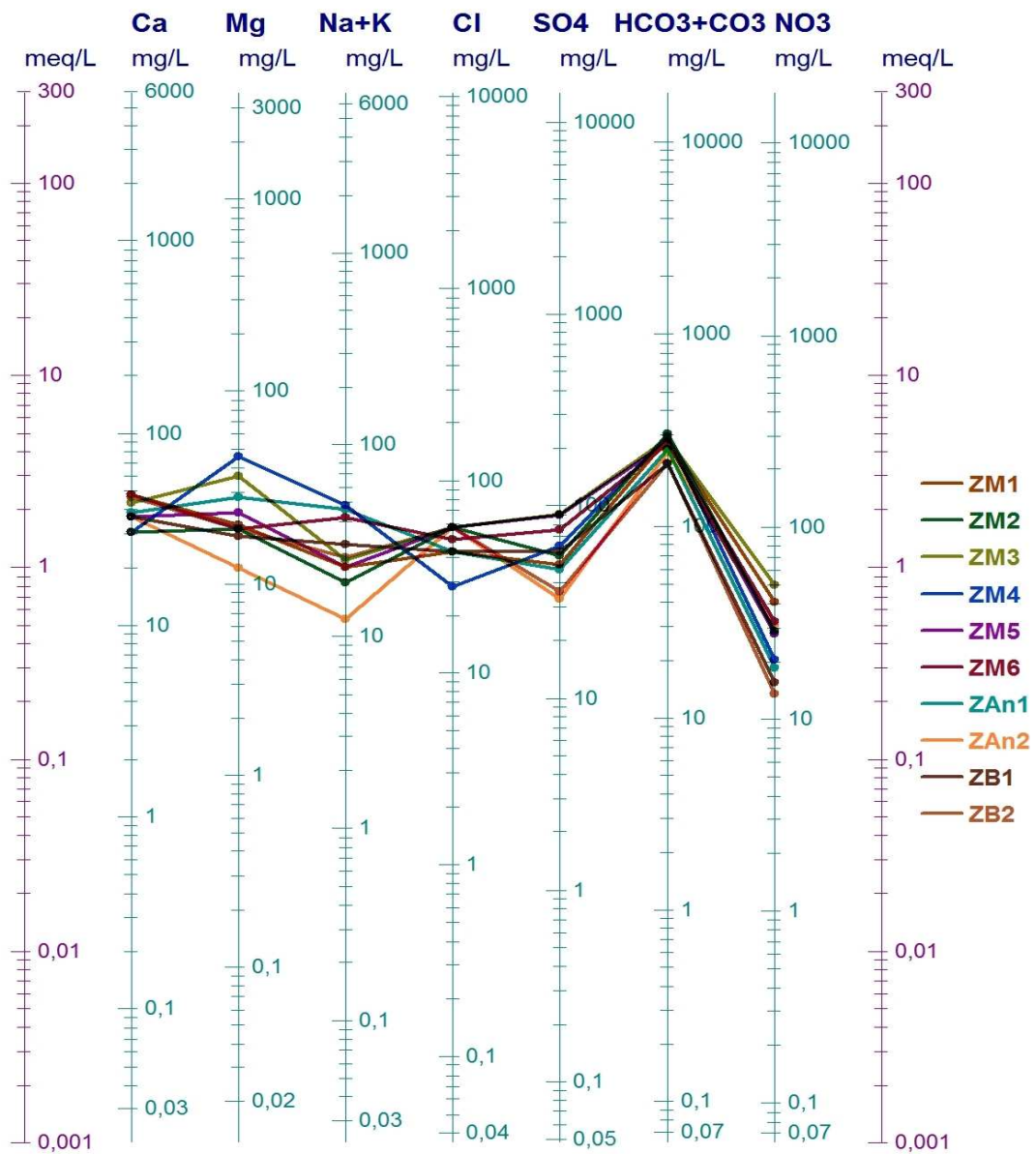


Figure 40 : chimie des eaux de l'oued Moulouya et du barrage Hassan II (Février, 2013)

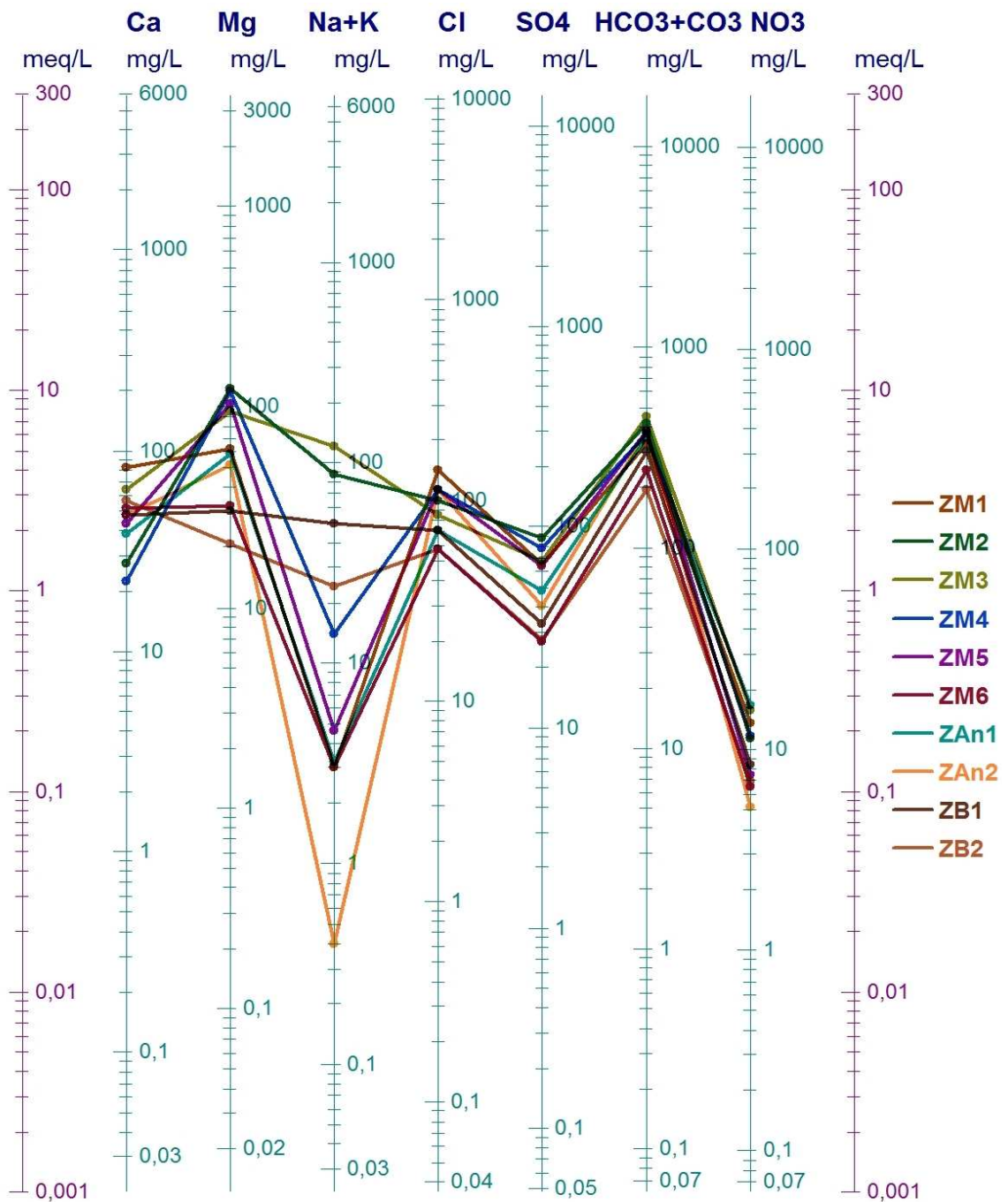


Figure 41 : chimie des eaux de l'oued Moulouya et du barrage Hassan II (Juin, 2013)

V. chimie des eaux au cours du temps et origine des éléments minéraux

Dans la nature, toutes les eaux qu'elles que soient leurs origines, sont plus ou moins minéralisées au cours de leurs trajets souterraines ou superficiels. Les eaux dissolvent en quantités variables, en fonction de certains paramètres (pH, Eh, température), les minéraux des roches et des minéralisations des terrains traversés. Ainsi, les quantités relatives des différents éléments minéraux en solution confèrent à l'eau son faciès prédominant.

Pour une eau carbonatée, l'essentiel de la minéralisation provient de la circulation dans des formations géologique carbonatés, donnant dans l'eau des éléments fondamentaux, à savoir le calcium (Ca^{2+}), les bicarbonates (HCO_3^- principalement), qui entrent dans la réalisation des équilibres calco-carboniques.

D'après les résultats obtenus des éléments majeurs, on constate que la chimie des eaux de l'oued Moulouya n'est pas constante au cours du temps. Ainsi, Les courbes d'évolution des constituants chimiques ne sont pas superposables, bien que le rythme de leurs évolutions soit identique, tels que Na^+ ; Cl^- ; Mg^{2+} et Ca^{2+} .

Les eaux de l'oued Moulouya se distinguent par des variations saisonnières des concentrations en ions majeurs. En effet, les concentrations en différents éléments majeurs sont plus importantes en période sèche que celles de la période de pluie. Les faibles teneurs s'expliquent par le fait que les eaux en période de pluie sont généralement plus courantes et assistent à un phénomène de lessivage, dont la conséquence est le transport d'éléments chimiques vers l'oued. Pendant la saison sèche, le débit des eaux de l'oued diminue, la vitesse de l'eau est faible, le temps des réactions est plus important et par conséquent, une augmentation des concentrations des éléments majeurs dans l'eau suite aux dissolutions.

V.1. Indices de saturation

Le calcul de l'indice de saturation d'une eau permet d'identifier les dissolutions et les précipitations ayant eu lieu au cours du contact de l'eau avec les composantes minérales de l'encaissant. Il permet également de déterminer l'état d'équilibre de l'eau vis-à-vis des minéraux présents dans le milieu.

En effet, la nature chimique de l'eau influence les types de réactions qui se produisent dans l'interface eau-sédiment. Une eau agressive est définie comme étant sous saturée ($\text{IS} < 0$), c'est-à-dire que les conditions sont favorables à une dissolution des minéraux solubles. Alors qu'une eau incrustante est définie comme étant sursaturée ($\text{IS} > 0$), c'est-à-dire que les conditions sont favorables à une précipitation de ces minéraux.

Dans le cas de la présente étude, le calcul de l'indice de saturation est consacré aux minéraux suivants : la Calcite (CaCO_3), la dolomite ($\text{Ca,Mg}(\text{CO}_3)_2$), le gypse [$(\text{CaSO}_4)_2\text{H}_2\text{O}$], et l'Anhydrite (CaSO_4), en utilisant le Logiciel Diagramme (Phreeq).

L'étude des indices de saturation des eaux d'oued Moulouya vis-à-vis des minéraux cités ci-dessus, montrent que ces eaux sont en équilibres à légèrement sursaturées (valeurs

positives) dans le cas de la dolomite et la calcite pendant les deux campagnes (Fig.42, 43), ce qui induit que l'oued Moulouya à une tendance de déposer les sédiments carbonatés. Au niveau des stations du barrage lors de période de pluie les eaux deviennent sous saturés vis-vis de ces deux éléments. Ceci est confirmé par la diminution du pH au niveau de ces stations. En effet, les eaux de l'oued Moulouya déposent au cours de leur parcours vers le barrage, les sédiments carbonatés ($IS > 0$) jusqu'à ce qu'elles deviennent sous saturées à nouveau dans les stations du barrage.

Toutefois, on remarque une sous-saturation vis-à-vis du gypse et de l'anhydrite au niveau de toutes les stations, reflétant également le caractère érosif de l'oued Moulouya, c'est-à-dire une propension à dissoudre le gypse et l'anhydrite. Par conséquence, il y'a augmentation de la concentration du calcium et par suite du rapport Ca/Mg.

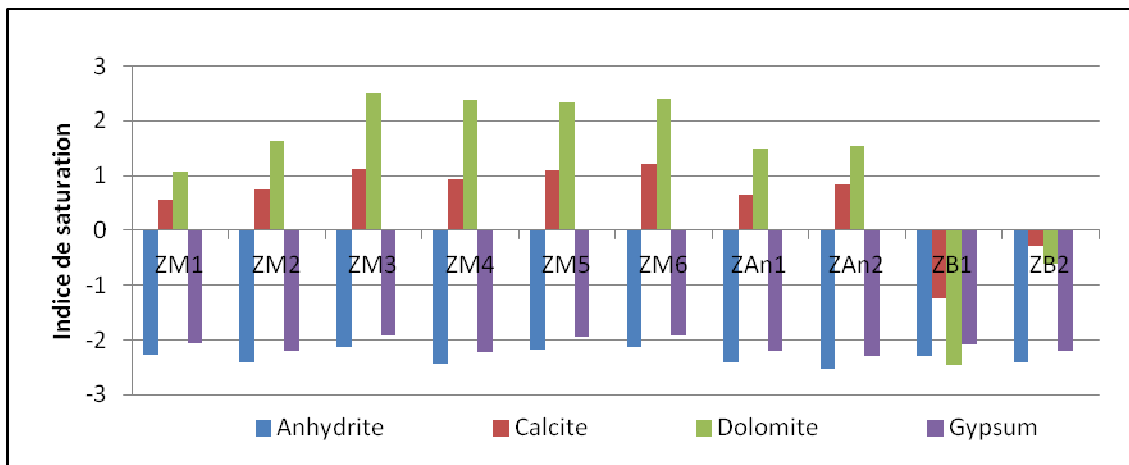


Figure 42 : indice de saturation des eaux de la retenue du barrage Hassan II (Février, 2013)

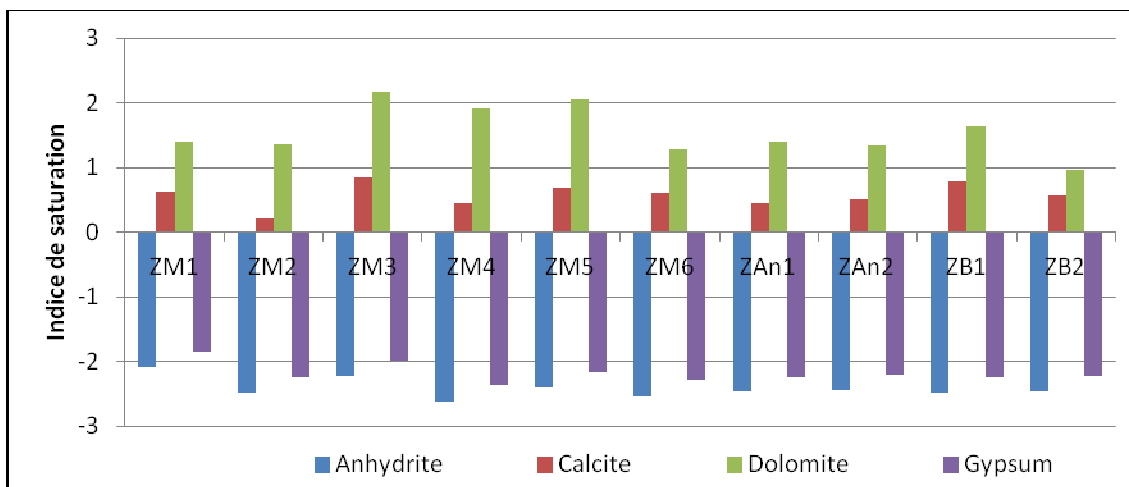


Figure 43 : indice de saturation des eaux de la retenue du barrage Hassan II

V.2 Analyse en composante principale (ACP)

Un traitement statistique ACP (analyse en composantes principales) a été appliqué à l'ensemble des paramètres en période humide et en période sèche en vue d'identifier les variables qui définissent la majorité de la minéralisation des eaux de la retenue du barrage Hassan II, et la manière dont les ions se regroupent. De cette façon, différents groupes peuvent s'en dégager. Cette méthode est largement utilisée pour interpréter les données hydrochimiques (Bennasser, 1997; El Morhit et al, 2008)

Le grand intérêt de l'ACP réside aussi dans le fait qu'elle prend en compte toutes les variables entrées simultanément et que l'interprétation des résultats se limite le plus souvent à l'interprétation des premières composantes. Des cercles de corrélations permettent de schématiser les liens existant entre les différentes variables étudiées.

Dans le cas de la présente étude, l'ACP a été effectuée sur une matrice de données constituée de 10 stations des deux compagnes et sèche, présentant les individus. Les 12 variables retenues sont représentées par les paramètres physiques utilisés (Températures, conductivité, et le pH) et les éléments chimiques majeurs mesurés.

L'examen des résultats de l'analyse en composantes principales de la matrice de données, permet de connaître les contributions des différentes composantes aux principaux axes. Ces résultats sont présentés sur le Tableau ci-dessous (tab. 5) Ainsi, les deux premiers axes 1 et 2 expriment (37,28 ; 22,04%) et (50,43 % ; 15,11%) de la variance totale respectivement en période de pluie et période sèche. Les deux premières composantes principales ne reconstruisent donc que 59,32% et 65,5% de la variance totale. Ce phénomène est normal lorsque le nombre de variables étudiées est relativement élevé (LAGARDE, 1983 ; DAGNELI, 1986 *in* BENMESSAOUD, 2007)

Tableau 5 : Valeurs propres et pourcentages de contribution des deux premiers axes

	Période de pluie		période sèche	
	F1	F2	F1	F2
Valeur propre	4,474	2,645	6,052	1,814
Variabilité (%)	37,284	22,044	50,431	15,119
% cumulé	37,284	59,328	50,431	65,55

L'examen de la matrice de corrélation entre les variables pour les deux périodes révèle la présence lors de la saison humide (tab. 6):

- D'une corrélation entre la conductivité et les ions HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , NO_3^- . Ces fortes corrélations montrent que les variations des charges ioniques dissoutes sont entièrement ou en partie liées aux variations des teneurs de ces différents ions. Alors qu'il est négativement corrélé avec Cl^- et Ca^{2+} ;
- D'une corrélation significative entre le pH et les ions bicarbonates et carbonates;
- D'une moyenne corrélation entre les bicarbonates et les nitrates;
- D'une forte corrélation entre le pH et la conductivité.

Lors de la saison sèche, on remarque des nouvelles corrélations apparues entre les différents éléments, notamment (Tab.6) :

- Une forte corrélation entre les ions SO_4^{2-} avec les ions Mg^{2+} , Na^{2+} et HCO_3^- ;
- Une corrélation entre Na^{2+} avec les ions Mg^{2+} et K^+ ;

Tableau 6 : Matrice de corrélation entre les variables de l'ACP (Février, 2013)

Variables	CE	T	pH	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ²⁺	K ⁺
CE	1	0,124	0,849	-0,026	0,713	0,765	0,862	0,684	-0,104	0,479	0,045	0,146
T	0,124	1	0,531	0,152	0,005	0,459	-0,140	-0,104	-0,283	-0,043	-0,191	0,489
pH	0,849	0,531	1	0,126	0,441	0,771	0,694	0,545	-0,102	0,358	-0,106	0,325
Cl ⁻	-0,026	0,152	0,126	1	0,093	0,251	-0,150	0,297	0,229	-0,559	-0,482	-0,670
SO ₄ ²⁻	0,713	0,005	0,441	0,093	1	0,516	0,418	0,491	0,026	0,429	0,338	-0,190
CO ₃ ²⁻	0,765	0,459	0,771	0,251	0,516	1	0,486	0,433	-0,375	0,241	-0,337	0,251
HCO ₃ ⁻	0,862	-0,140	0,694	-0,150	0,418	0,486	1	0,625	-0,179	0,468	0,018	0,077
NO ₃ ⁻	0,684	-0,104	0,545	0,297	0,491	0,433	0,625	1	0,331	0,108	-0,245	-0,298
Ca ²⁺	-0,104	-0,283	-0,102	0,229	0,026	-0,375	-0,179	0,331	1	-0,286	0,223	-0,383
Mg ²⁺	0,479	-0,043	0,358	-0,559	0,429	0,241	0,468	0,108	-0,286	1	0,428	0,515
Na ²⁺	0,045	-0,191	-0,106	-0,482	0,338	-0,337	0,018	-0,245	0,223	0,428	1	0,128
K ⁺	0,146	0,489	0,325	-0,670	-0,190	0,251	0,077	-0,298	-0,383	0,515	0,128	1

Tableau 7 : Matrice de corrélation entre les variables de l'ACP (Juin, 2013)

Variables	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ²⁺	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	T°	pH	EC
Ca ²⁺	1	-0,480	0,000	-0,098	0,128	0,404	-0,356	0,079	-0,309	-0,291	-0,013	-0,311
Mg ²⁺	-0,480	1	0,363	0,770	0,550	-0,650	0,920	0,403	0,953	0,346	-0,401	0,924
K ⁺	0,000	0,363	1	0,770	-0,164	0,142	0,335	0,378	0,403	0,002	0,006	0,293
Na ²⁺	-0,098	0,770	0,770	1	0,258	-0,267	0,666	0,476	0,753	0,163	-0,063	0,768
Cl ⁻	0,128	0,550	-0,164	0,258	1	-0,507	0,658	0,153	0,643	-0,029	-0,556	0,557
CO ₃ ²⁻	0,404	-0,650	0,142	-0,267	-0,507	1	-0,583	-0,233	-0,683	0,030	0,353	-0,551
HCO ₃ ⁻	-0,356	0,920	0,335	0,666	0,658	-0,583	1	0,493	0,920	0,437	-0,585	0,878
NO ₃ ⁻	0,079	0,403	0,378	0,476	0,153	-0,233	0,493	1	0,539	0,487	-0,421	0,306
SO ₄ ²⁻	-0,309	0,953	0,403	0,753	0,643	-0,683	0,920	0,539	1	0,235	-0,544	0,830
T°	-0,291	0,346	0,002	0,163	-0,029	0,030	0,437	0,487	0,235	1	-0,392	0,425

pH	-0,013	-0,401	0,006	-0,063	-0,556	0,353	-0,585	-0,421	-0,544	-0,392	1	-0,316
EC	-0,311	0,924	0,293	0,768	0,557	-0,551	0,878	0,306	0,830	0,425	-0,316	1

Dans le cercle de corrélation, la première composante (axe 1) est définie par les facteurs pH, CE, CO_3^{2-} et HCO_3^- ayant permis à la contribution de cet axe traduisant le système calco-carbonique. Pour le deuxième axe, il est fortement corrélé du côté positif avec les Chlorures. Alors que sur le côté négatif est définie par le potassium.

L'application d'une classification hiérarchique aux résultats de l'analyse en composantes principales, a permis de classer les stations étudiées au niveau de l'oued Moulouya, pour les deux périodes (de pluie et sèche).

- **Saison Humide :**

Les stations sont réparties en quatre groupes distincts :

Groupe 1 : comprend les stations situées en aval de la zone d'étude (stations du barrage), il est caractérisé par les conductivités et pH les plus faibles. Ces stations sont également moyennement minéralisées par rapport aux stations situées en amont. En effet, le barrage Hassan II a un rôle important dans la dilution des concentrations provenant de l'amont du cours d'eau.

Groupe 2 : constitué par la plupart de stations situées au niveau et en aval de la mine de Zeida, excepté la station ZM4. Ce groupe est caractérisé par une forte minéralisation, les stations se trouvent plus chargées en bicarbonates et en sulfates. Ces stations font apparaître l'effet du lessivage des résidus riches en ces éléments.

Groupe 3 : Situé du côté négatif de l'axe F1. Il est caractérisé par une minéralisation moyenne. Ce groupe comprend la station ZM1 et la station de l'oued Ansegmir (ZAn1).

Groupe 4 : situé au côté négatif de l'axe F2. Il traduit l'effet de la géologie de la zone.

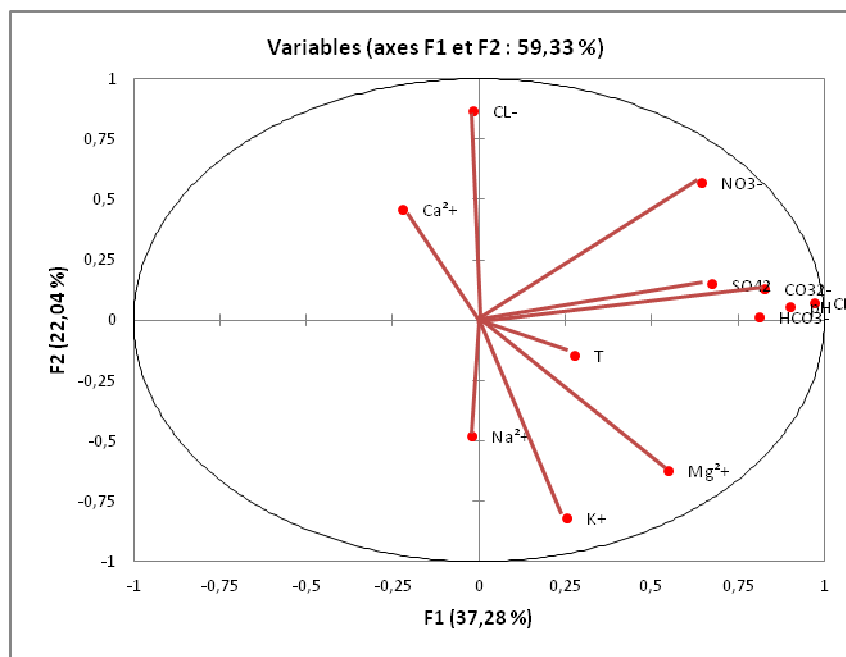


Figure 44 : Diagramme de composantes principales (variables, axes F1 et F2 : 59,328%)
(Février, 2013)

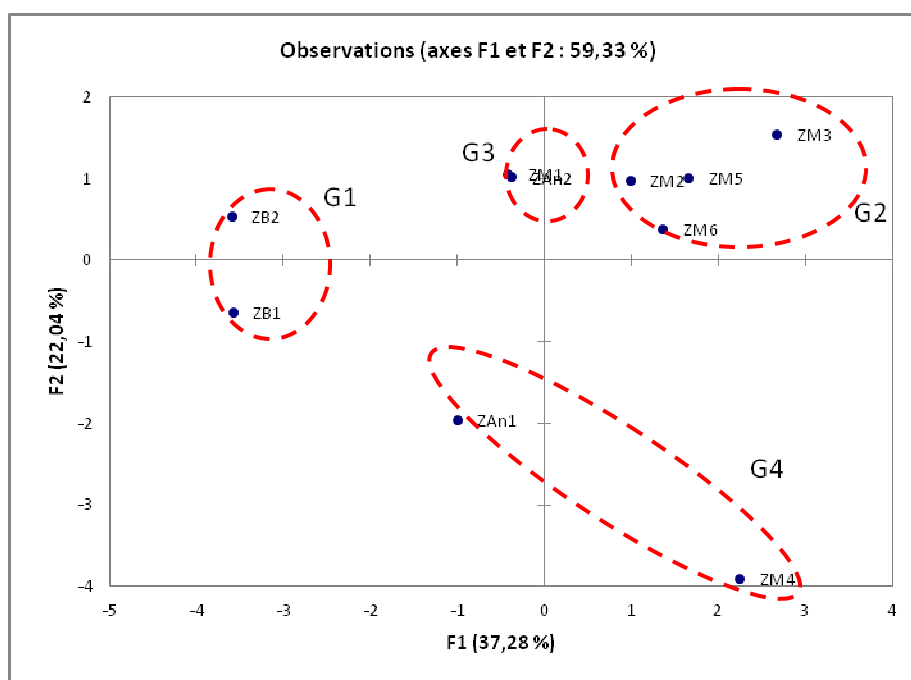


Figure 45 : Diagramme des composantes principales (individus, axes F1 et F2 : 59,328%)
(Février, 2013)

- Saison sèche

La matrice de corrélation montre que F1 est corrélé positivement aux ions : Mg^{2+} , Na^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} . Cet axe est constitué principalement par des éléments qui évaluent le degré de

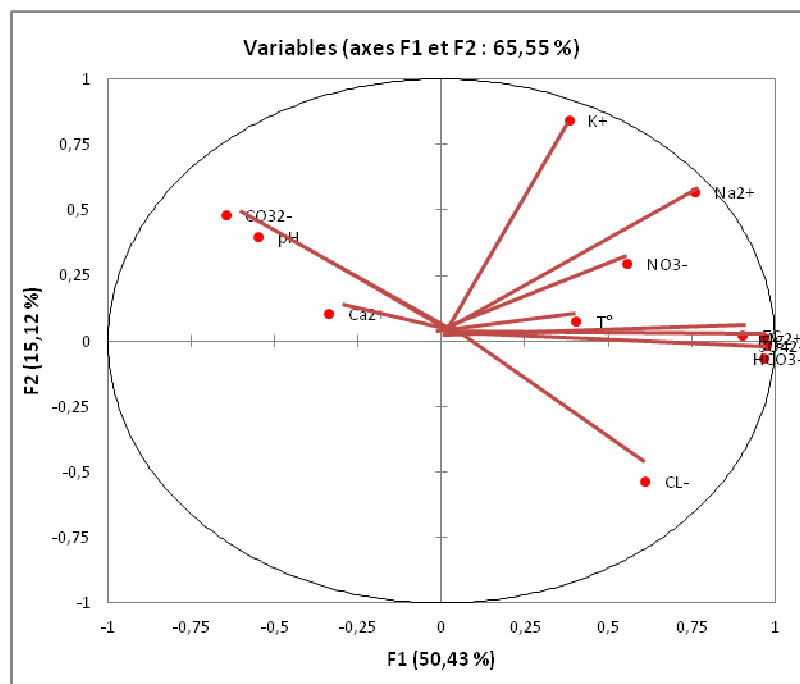
la minéralisation de l'eau. Par contre, le potassium quant à lui forme un groupe particulier : il est corrélé positivement sur l'axe II.

L'analyse globale permet de définir une typologie dominée par l'individualisation de trois groupes de stations G1, G2 et G3 (Fig.47).

Groupe 1 : c'est le petit groupe, situé du côté positif de l'axe F1, il comprend la station située au niveau de la mine. Il représente une forte minéralisation causée principalement par la présence des bicarbonates, magnésium et les sulfates.

Groupe 2 : il est constitué par les échantillons les plus minéralisés (ils présentent les valeurs les plus fortes de conductivité).

Groupe 3 : situé du côté négatif de l'axe F1, il présente les pH les plus élevés. Ils correspondent à des eaux alcalines prélevées au niveau du barrage.



**Figure 46 : Diagramme de composantes principales (variables, axes F1 et F2 : 65,55%)
(Juin, 2013)**

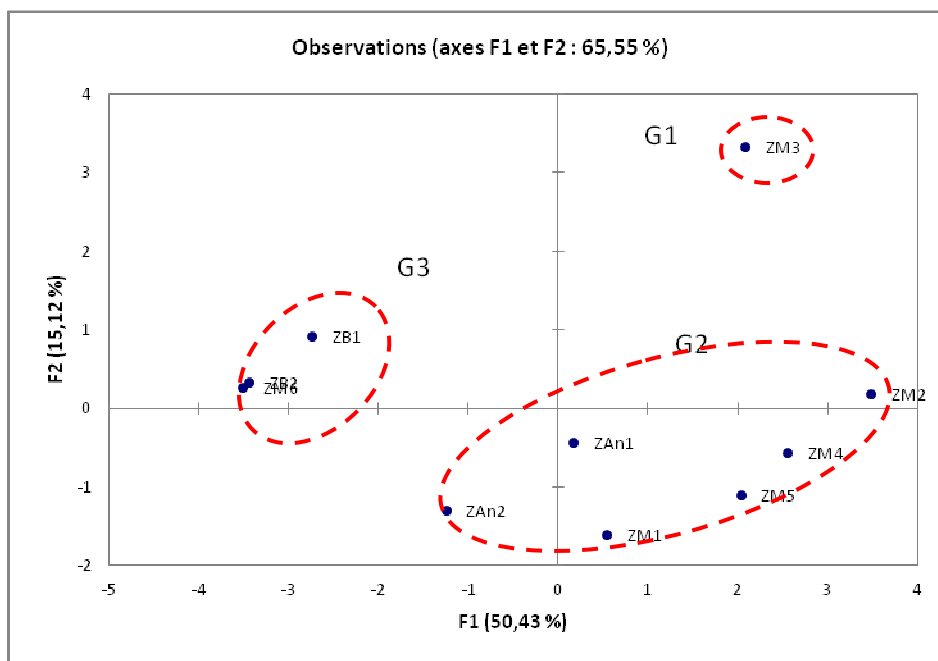


Figure 47 : Diagramme des composantes principales (individus, axes F1 et F2 : 65,55% (Juin, 2013)

L'analyse en composante principale a permis de confirmer l'origine de certains ions présents dans le site d'étude. Autrement dit, le milieu est localement riche en éléments de lessivage du milieu environnant et des rejets de la mine situés au bord de l'oued. L'origine du nitrates et leurs variations dans le temps reste quant à elle une énigme et est probablement multiple (naturels et anthropiques).

Il résulte de cette analyse multi variée l'existence de trois à quatre groupes d'éléments varie en fonction de saison discriminés par des origines différentes. Nous avons différencié, le pôle terrigène défini par les ions sulfate et magnésium, le pôle assises carbonatées avec l'ion calcium et un pôle anthropique caractérisé par l'ion nitrate.

VI. Qualité des eaux

On définit la qualité d'une eau selon les domaines de son utilisation, c.-à-d les usages auxquelles elle est destinée. Dans la présente d'étude, les eaux de la retenue du barrage Hassan II sont destinées à la fois; à l'irrigation des périmètres à basse Moulouya, ainsi que la satisfaction de la demande en eau potable des centres urbains avales (Missour, Outat Ihaj, Guerssif,...). Pour le village Zeïda situé au voisinage de la mine abandonnée et en amont du barrage Hassan II, il est desservi par un réseau d'adduction d'eau sans traitement préalable. Les enquêtes sur le terrain, les observations et les analyses au laboratoire ont permis de

déterminer la qualité physico-chimique des eaux de l'oued Moulouya et de la retenue du barrage Hassan II, afin d'appréhender les éventuels risques liés à sa consommation.

Selon la température de l'eau (degré de froid ou de chaleur de l'eau), d'après l'OMS (2006) une eau de boisson doit avoir une température de 25°C. On peut donc remarquer que la température de l'eau étudiée est dans la limite de potabilité que ce soit pour les eaux de l'oued Moulouya que pour les eaux du barrage Hassan II.

Selon le pH de l'eau représentant son acidité ou son alcalinité, d'après les directives de l'OMS, une eau de boisson doit avoir un pH compris entre 6,5 et 8,5. La moyenne du pH des eaux de la retenue du barrage est en général dans la limite de cet intervalle.

Selon les valeurs de conductivités des différents échantillons qui sont moyennement faibles en période d'hiver, et élevées en période sèche, ces valeurs ne dépassent pas en général les normes de potabilité.

La comparaison des différents résultats obtenus pour les anions dans les eaux de l'oued Moulouya avec la grille de qualité de l'eau potable (B.ON°5062 DU S.12.2002), montre que la qualité de ces eaux se caractérise par des teneurs moyennement faibles en Nitrates et en chlorures, ce qui peut engendrer une absence de goût et d'odeur dans cette eau.

Selon les concentrations en nitrates (NO₃-), tous les échantillons présentent des teneurs inférieures aux normes de potabilité. La quasi-totalité des échantillons présentent des teneurs en sulfates (SO₄²⁻) inférieures aux normes de potabilité,

Les seuils concernant les divers paramètres physicochimiques généraux qui contribueront à caractériser la masse d'eau dans notre cas ne sont pas dépassés. Globalement, on peut aisément dire que la qualité physico-chimique des eaux de l'oued Moulouya destinée à la consommation des populations est Bonne (en période de pluie) à moyenne (en période sèche).

Les résultats d'analyse des éléments traces métalliques dans la seule phase dissoute, nous n'ont pas permis de distinguer avec certitude la pollution métallique des eaux étudiées, la comparaison des différents résultats obtenus pour les ETM avec les normes (annexe) reste donc inadaptée. En effet, selon Blanquet (2004), dans les conditions naturelles, les ETM sont peu solubles 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. Le non prise en compte des

matières en suspension, suite à la filtration des échantillons d'eau avant analyse suite aux exigences de l'appareil donnent lieu à la soustraction (élimination sur les filtres) d'une quantité importante d'ETM ne faisant pas l'objet d'analyses. Ainsi, les valeurs des concentrations en ETM mesurées dans les eaux filtrées sont sous-estimées et n'associent pas les quantités d'ETM sous forme particulaire.

Par ailleurs, les résultats des analyses des ETM dans les sédiments se sont révélés excessivement élevés (Azhari, 2013) ceci est en faveur des concentrations élevés en ETM dans la phase particulaire.

Concernant l'usage des eaux pour l'irrigation, la comparaison des concentrations (en particulier pour les ETM) avec la valeurs données par la grille de qualité des eaux destinées à l'irrigation ne pouvant pas être faite. Ainsi on ne peut pas juger de la qualité des eaux de l'oued Moulouya et du barrage Hassan II pour l'usage agricole. Les eaux destinées à l'irrigation doivent aussi répondre à certaines normes de qualité physico-chimiques et microbiologique en particulier les teneurs en ETM.

Conclusion générale

Les résultats obtenus dans ce travail nous ont permis de faire une évaluation de la qualité physico-chimique des ressources en eau de surface de la Haute Moulouya à l'oriental du Maroc (eaux de l'oued Moulouya, Oued Ansegmir, Barrage Hassan II) ainsi que la variation du chimisme des eaux au cours de la saison humide et de la saison sèche.

Les résultats montrent que les eaux de surface étudiées au voisinage de la mine de Zeïda présentent une légère tendance à l'alcalinité. La minéralisation des eaux est assez importante due aux teneurs de bicarbonates mais surtout aux teneurs élevées en calcium et en magnésium provenant du substrat calcaire, marno-calcaire, gypsifère et dolomitique caractéristique de la région. Les eaux de l'oued Moulouya sont ainsi légèrement saturées en carbonates. La conductivité des eaux est élevée en particulier pendant la saison sèche et au voisinage de la mine de Zeïda, il est de même pour les matières en suspension.

Certains éléments majeurs (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^- , NO_3^- , HCO_3^-) montrent des concentrations élevées en particuliers au niveau des stations situées au voisinage de la mine et généralement pendant la saison sèche. Au niveau du barrage Hassan II, l'augmentation des concentrations n'est pas très distinguée. La diminution des concentrations est remarquée pour la majorité des éléments dans l'Oued Moulouya vers l'aval de la mine Zeïda à partir de la station M5 avant le point de confluence avec l'Oued Ansegmir. Des phénomènes chimiques, en particulier la dilution et la complexations dans la colonne d'eau, devraient influencer le comportement des éléments chimiques dans l'eau est donc leurs concentrations à partir de la confluence Oued Moulouya Oued Ansegmir et vers le barrage HassanII. En général le faciès des eaux de l'oued Moulouya et du barrage Hassan II est bicarbonaté calcique et magnésien.

Les résultats d'analyse des éléments traces métalliques dans la seule phase dissoute, nous n'ont pas permis de donner un jugement perspicace sur la pollution métallique des eaux étudiées. La non prise en compte des matières en suspension, suite à la filtration des échantillons d'eau avant analyse suite aux exigences de l'appareil de mesure, donne lieu à la soustraction (élimination sur les filtres) d'une quantité importante d'ETM ne faisant pas l'objet d'analyses. Ainsi, les valeurs des concentrations en ETM mesurées dans les eaux filtrées sont sous-estimées et n'associent pas les quantités d'ETM sous forme particulaire.

L'étude de la phase particulaire dans les eaux étudiées doit être refaite afin de connaître les teneurs totales réelles en ETM, et pour juger correctement la qualité des eaux consommées sans traitement préalable par la population locale jusqu'à aujourd'hui. Des résidus miniers de traitement au niveau de Zeïda étant situés sur les berges et sur le parcours même de l'oued Moulouya, subissent la dispersion. La décharge des composants de ces résidus miniers dans les cours d'eau est incontestable. En effet, les rejets miniers abandonnés sans végétalisation, restés sur places sans aucune réhabilitation, subissent l'effet d'une érosion intense. Le lessivage et le transport éolien des éléments traces sous forme dissoute et particulaire s'effectuent vers le réseau hydrographique.

Toutefois, les seuils concernant les divers paramètres physicochimiques généraux qui contribueront à caractériser la masse d'eau dans notre cas ne sont pas dépassés. Abstraction faite de la non prise en compte des concentrations des ETM non déterminées suite à la filtration de la phase particulaire, et selon la grille de qualité des eaux de surface on peut dire que la qualité physico-chimique des eaux de l'oued Moulouya et du barrage Hassan II destinée à la consommation des populations est en général moyenne à bonne. Selon la grille de qualité des eaux destinées à la production de l'eau potable ces eaux nécessitent un traitement physique simple et la désinfection pour qu'elles soient aptes à la consommation humaine.

Enfin, et dans le but de compléter cette étude sur la contamination métallique de l'oued Moulouya et le barrage Hassan II, d'autres études permettant une approche analytique susceptible d'accroître la compréhension des phénomènes toxicologiques globaux peuvent être envisagées.



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 3ème cycle, FST, Dakar, 148 p.

AMADE, E. 1965. Les gisements de plomb de Zeïda et de Bou-Mia. Colloque sur des gisements stratiformes de plomb, zinc et de manganèse du Maroc. Notes & M. Serv. Géol. Maroc, N° 181, pp: 175-184.

A. MOUTTAQI, E.C. RJIMATI, L. MAACHA, A. MICHARD, A. SOULAIMANI & H. IBOUH. 2011. les principales mines du Maroc. Nouveaux guides géologiques et miniers du Maroc, volume 9. Notes & M. Serv. Géol. Maroc, N° 564, pp: 299-302.

ARANGUREN , M.M.S. 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. Doctorat de l'université de Toulouse, université Toulouse III, Paul Sabatier, 381p.

ARIES, S. 2003. Mise en évidence de contaminations métalliques historiques à partir de l'étude d'enregistrements sédimentaires de lacs de haute montagne. Thèse de Doctorat. Université Toulouse III- Paul Sabatier U.F.R.S.V.T., 277p.

BENMESSAOUD, F, 2007. Qualité physico-chimique, métallique et bactériologique des eaux de l'estuaire du Bou Regreg et impact des sur la biologie et la démographie de *Venerupis decussata* (LINNE, 1758). Thèse de doctorat d'état, faculté des sciences rabat, 306p.

BLANQUET, J.P., BONNOMET, 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.

BOUGHROUS, A.A 2007. Biodiversité, écologie et qualité des eaux souterraines de deux régions arides du Maroc : le Tafilalet et la région de Marrakech. Thèse de 3ème cycle, faculté des sciences Semlalia Marrakech, 207p.

BOUABDLI, A., SAÏDI, N., EL FOUNTI, L. & LEBLANC, M. 2004. Impact de la mine d'Aouli sur les eaux et les sédiments de l'oued Moulouya (Maroc). Bulletin Société Histoire Naturelle Toulouse 140,27-33. **B.R.G.M. 1999.** Les résidus miniers français: typologie

et principaux impacts environnementaux potentiels. Techniques de l'industrie minière 3: 3ème Trimestre, pp : 77-110.

COMBE, M. & MONITION, L. 1971. Présentation du domaine du Maroc oriental. Ressources en eau du Maroc (Tome1), Domaine du Rif et du Maroc oriental. Notes & M. Serv. Géol. Maroc, N° 231, pp : 183-192.

COMBE, M. & SIMONOT, M. 1971. La Haute Moulouya, le sillon d'Itzer-Enjil et le massif de Bou-Mia-Aouli. Ressources en eau du Maroc (Tome1), Domaine du Rif et du Maroc oriental. Notes & M. Serv. Géol. Maroc, N° 231, pp: 193-201.

CHIFFOLEAU, J.F. & TRUQUET, I. 1994. Nouvelles méthodes de dosages des métaux traces dans les sédiments et les matières en suspension. R. INT. DEL. 08-94 IFREMER.

EL HACHIMI, M.L., EL HANBALI, M., BOUABDLI, A., EL FOUNTI, L., SAIDI, N. & FEKHAOUI, M. 2005A. Les résidus miniers de traitement des mines Aouli-Mibladen-Zeïda abandonnés dans la Haute Moulouya (Maroc) : Risques et impacts environnementaux. 3èmes journées internationales des géosciences de l'environnement. El Jadida-Maroc, 8-10 Juin 2005.

EL HACHIMI, M.L., EL HANBALI, M., FEKHAOUI, M., BOUABDLI, A., EL FOUNTI, L., SAIDI, N. 2005B. Impact d'un site minier abandonnée sur l'environnement : Cas de la mine de Zeïda (Haute Moulouya, Maroc). Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la terre, n°27, 93-100.

EL HACHIMI, M.L., EL FOUNTI, L., BOUABDLI, A., SAIDI, M. & FEKHAOUI, M., N. 2005C. Impact de la mine abandonnée de Zeïda (Maroc) sur la qualité des eaux de surface. Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Toulouse, T. 141- 1, pp : 81-88.

EL HACHIMI, M.L., EL FOUNTI, L., BOUABDLI, A., SAIDI, N., FEKHAOUI, M. & TASSE N. 2006. Pb et As dans des eaux alcalines minières: Contamination, comportement et risques (mine abandonnée de Zeïda, Maroc). Revue des sciences de l'eau, Volume 19.

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). Revue Déchets Sciences Techniques n° 63 Mas 2013, supplément au n°323 de Environnement & Techniques .

EMBERGER, A. 1961. Le district plombifère de la Haute Moulouya : Observations sur la structure du socle ancien et de sa couverture secondaire dans la région d'Aouli et de Mibladen. Mines et géologie, Direction Mines et Géol. Maroc, N° 13, pp : 59-62.

EMBERGER, A. 1965A. 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.

EMBERGER, A. 1965B. Eléments pour une synthèse métallogénique du district plombifère de la Haute Moulouya. Colloque sur des gisements stratiformes de plomb, zinc et de manganèse du Maroc. Notes & M. Serv. Géol. Maroc, N° 181, pp : 205-244.

ENNACIRI, S. 2000. Impact de l'activité minière sur l'environnement. Mémoire DESA. Université Mohamed V. Ecole Mohammadia d'Ingénieurs Rabat 64p.

FERGUSSON, J.E. 1990. The heavy elements: chemistry, environmental impact and health effects. Pergamon Press, New York.

GAUJOUS, D. 1995. la pollution des milieux aquatiques: aide mémoire (2e ed). Lavoisier Tec & Doc. Londres-NewYork, 220 p

HAGUENOER, J.M. & FURON, D. 1984. Toxicologie et hygiène industrielle, les dérivés minéraux, 2ème partie, Techniques et Documentation- Lavoisier, Paris. pp : 253-301.

LALLOGO, H. 1992. Concentration de certains métaux d'importance médicale dans les poisons: cas des poisons de la lagune de Lomé. Mémoire de Technicien Supérieur en Génie Sanitaire (EAM), UL, 36 p

LEE, C.G., CHON H.T. & JUNG M.C. 2001. Heavy metal contamination in the vicinity of the Daduk Au-Ag-Pb-Zn mine in Korea. Applied Geochemistry 16, 1377-1386.

MAKHOUKH, M.; SBAA, M.; BERRAHOU, A.; CLOOSTER, M. V. 2011. Contribution a l'étude physico-chimique des eaux Superficielles de l'oued Moulouya (Maroc oriental). Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 09, pp : 149-169.

MINEAR, R. A. & KEITH, L. H. 1982. Wather analysis. Vol.1, Inorganic Species, Part.1, Academic Press, New York

MIQUEL, G. 2001. Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. Rapport, office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 346p.

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'Ahouli – Mibladen, Maroc. Doctorat national. Univ. Mohammed V. Rabat. pp. 1 – 30.

N'GUESSAN, Y. M. 2008. Dynamique des éléments traces dans les eaux de surface des bassins versants agricoles de Gascogne. Doctorat de l'université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT), 213p.

NRIAGU, J.O. 1978. The biogeochemistry of lead in the environment. Elsevier, Amsterdam, 1011 pp.

PLUMLEE, G.S. ET ZIEGLER, T.L., 2003. The medical geochemistry of dust, soils and other earth materials. In: B.S. Lollar (Ed.), Environmental Geochemistry. Treatise on Geochemistry. Elsevier-Pergamon, Oxford, pp. 264-310.

RAYNAL, R. 1961. Plaines et piedmonts du bassin de la Moulouya (Maroc Oriental). Editions imframar, Rabat, Maroc.

RODIER J., LEGUBE B., MERLET N.et coll. 2009. L'analyse de l'eau. Paris, Dunod 9^{ème} édition, 1579 p.. **SIGG L., STUMM W. et BEHRA P. 1992.** Chimie des milieux aquatiques, chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement, 2^{ème} édition, Masson, Paris, 1994, 391p..

SIGG, L. BEHRA, PH. & STUMM, W. 2000. Chimie des milieux aquatiques : chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement. 3^{ème} édition. Dunod, Paris.

SMEDLEY, P.L. & KINNIBURGH, D.G. 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. Applied Geochemistry 17,517-568.

STUMM, W. AND MORGAN, J.J. 1996: Aquatic Chemistry, Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1022p.

WILSON, J.D., BRAUNWALD, E., ISSELBACHER, K.J., PETERSDORF, R.G., MARTIN, J.B., FAUCIA, A. & ROOT, R. K. 1993. Principes de médecine interne. Tome 2, 2182-2185.<http://tox.etm.free.fr/zinc.html>



ANNEXES

Analyses physico-chimique mesuré in-situ des eaux de surface (oued Moulouya et barrage Hassan II)

stations	Saison humide						Saison sèche					
	T (°C)	PH	CE (µs/cm)	Eh (mv)	O2 (mg/l)	O2(‰)	T° (°C)	pH	EC (µs/cm)	Eh (mv)	O2 (%)	O2 (mg/l)
ZM1	7,8	7,93	588	135	8,7	71,6	18,7	7,85	787	130	68,4	6,49
ZM2	10,1	8,33	610	133	6,9	67,6	20,1	7,8	1139	132	76,1	6,95
ZM3	10,4	8,64	647	125	8,6	87,8	22,1	8,1	1209	114	112,8	9,81
ZM4	11,3	8,58	633	107	8,82	81,3	20,5	8,17	1190	110	110,3	9,81
ZM5	12,8	8,71	628	110	7,68	70,6	21,4	8,09	1456	114	88,9	7,19
ZM6	12,4	8,74	635	123	7,84	74,5	20,4	8,24	525	106	93,2	8,36
ZAn1	13,6	8,2	522	120	7,4	63,1	24,2	7,88	734	126	67,5	5,63
ZAn2	14,8	8,43	535	106	7,01	78,2	21	7,92	753	125	69,7	6,22
ZB1	9,3	6,37	463	63	6,3	54	18	8,34	461	102	97,6	9,24
ZB2	9,4	7,21	457	173	8,75	77,1	18,2	8,22	452	108	84	7,93

Analyses chimique mesuré au laboratoire des eaux de surface (oued Moulouya et barrage Hassan II)

Variable	saison humide			saison sèche		
	Minimum	Maximum	Moyenne	Minimum	Maximum	Moyenne
CE	457	647	571,80	452	1456	870,6
T° (°C)	7,80	14,80	11,19	18	24,2	20,46
pH	6,37	8,74	8,11	7,8	8,34	8,061
CL-	28,40	56,80	48,99	56,8	142	92,3
SO42	33,33	90,12	59,50	26,832	88,452	53,976
CO32-	19,20	28,80	24,96	0	86,4	43,2
HCO3-	190,32	273,28	237,66	146,4	419,68	300,12
NO3-	13,60	50,30	27,90	5,2	16,6	10,36
Ca ²⁺	30,60	48,20	39,68	22,4448	81,7632	48,096
Mg ²⁺	12,00	45,60	24,00	20,8	123,2	69,68
Na ²⁺	1,00	18,00	11,90	7,7	32,1	15,58
K+	1,00	20,00	5,60	0,4	120,9	31,07

Indices de saturation des eaux de surface (oued Moulouya et barrage Hassan II)

	Indice de saturation (saison humide)				Indice de saturation (saison sèche)			
	Aragonite	Calcite	Dolomite	Gypsum	Aragonite	Calcite	Dolomite	Gypsum
ZM1	0.41	0.55	1.07	-2.06	0,47	0,62	1,39	-1,84
ZM2	0.60	0.74	1.64	-2.20	0,06	0,21	1,36	-2,25
ZM3	0.96	1.11	2.49	-1.92	0,69	0,84	2,17	-1,99
ZM4	0.78	0.93	2.38	-2.22	0,3	0,44	1,91	-2,37
ZM5	0.95	1.09	2.34	-1.95	0,54	0,69	2,06	-2,17
ZM6	1.08	1.22	2.41	-1.91	0,45	0,6	1,28	-2,29
ZAn1	0.50	0.64	1.50	-2.19	0,29	0,44	1,4	-2,24
ZAn2	0.70	0.84	1.55	-2.30	0,36	0,5	1,33	-2,21
ZB1	-1.39	-1.24	-2.46	-2.08	0,64	0,79	1,63	-2,25
ZB2	-0.44	-0.29	-0.62	-2.19	0,42	0,56	0,96	-2,22

**GRILLE DE QUALITE DES EAUX DE SURFACE (NORMES MAROCAINES) (B.O
N° 5062 DU 5.12.2002)**

			CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3	CLASSE 4	CLASSE 5
	Paramètres	Unités	Excellente	Bonne	Moyenne	Mauvaise	Très mauvaise
Organoleptiques			0				
1	Couleur (échelle Pt)	mg Pt/L	<20	20-50	50-100	100-200	>200
2	Odeur (dilu à 25° C)		<3	3-10	10-20	>20	-
Physico-chimiques							
3	Température	°C	<20	20-25	25-30	30-35	>35
4	PH		6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-9,2	<6,5ou>9,2	<6,5ou>9,2
5	Conductivité à 20° C	us/cm	<750	750-1300	1300-2700	2700-3000	>3000
6	Chlorures (Cl-)	mg/l	<200	200-300	300-750	750-1000	>1000
7	Sulfates (SO4-)	mg/l	<100	100-200	200-250	250-400	>400
8	MES	mg/l	<50	50-200	200-1000	1000-2000	>2000
9	O2 dissous	mg/l	>7	7-5	5-3	3-1	<1
10	DBO 5	mg/l	<3	3-5	5-10	10-25	>25
11	DCO	mg/l	<30	30-35	35-40	40-80	>80
12	Oxydabilité KMnO4	mg/l	=2	2-5	5-10	>10	-
Substances Indésirables							
13	Nitrates (NO3-)	mg/l	=10	10-25	25-50	>50	-
14	NTK	mgN/l	=1	1-2	2-3	>3	-
15	Ammonium	mgNH4/l	=0,1	0,1-0,5	0,5-2	2-8	>8
16	Baryum	mg/l	=0,1	0,1-0,7	0,7-1	>1	-
17	Phosphates (PO4- -)	mg/l	=0,2	0,2-0,5	0,5-1	1-5	>5
18	P total (Pt)	mg/l	=0,1	0,1-0,3	0,3-0,5	0,5-3	>3
19	Fe total (Fe)	mg/l	=0,5	0,5-1	1-2	2-5	>5
20	Cuivre (Cu)	mg/l	=0,02	0,02-0,05	0,05-1	>1	-
21	Zinc (Zn)	mg/l	<0,5	0,5-1	1-5	>5	-
22	Manganèse (Mn)	mg/l	=0,1	0,1-0,5	0,5-1	>1	-
23	Fluorure (F-)	mg/l	=0,7	0,7-1	1-1,7	>1,7	-
24	Hydrocarbures	mg/l	=0,05	0,05-0,2	0,2-1	>1	-
25	Phénols	mg/l	=0,001	0,001-0,005	0,005-0,01	>0,01	-
26	Détergents anioniques	mg/l	=0,2	=0,2	0,2-0,5	0,5-5	>5
Substances Toxiques							
27	Arsenic (As)	ug/l	=10	=10	10-50	>50	-
28	Cadmium (Cd)	ug/l	=3	=3	3-5	>5	-
29	Cyanures (CN-)	ug/l	=10	=10	10-50	>50	-
30	Chrome total (Cr)	ug/l	=50	=50	=50	>50	-
31	Plomb (Pb)	ug/l	=10	=10	10-50	>50	-
32	Mercure (Hg)	ug/l	=1	=1	<1	>1	-
33	Nickel (Ni)	ug/l	=20	=20	20-50	>50	-
34	Selenium (Se)	ug/l	=10	=10	=10	>10	-
35	Pesticides par subst	ug/l	=0,1	=0,1	=0,1	>0,1	-
36	Pesticides totaux	ug/l	=0,5	=0,5	=0,5	>0,5	-
37	H.P.A. totaux	ug/l	=0,2	=0,2	=0,2	>0,2	-
Bactériologiques							
38	Coliformes fécaux	/100ml	=20	20-2000	2000-20.000	>20.000	-
39	Coliformes totaux	/100ml	=50	50-5000	5000-50.000	>50.000	-
40	Streptoco. Fécaux	/100ml	=20	20-1000	1000-10.000	>10.000	-
Biologique							
41	Chlorophylle a	ug/l	<2,5	2,5-10	10-30	30-110	>110
40	Streptoco. Fécaux	/100ml	=20	20-1000	1000-10.000	>10.000	-
Biologique							
41	Chlorophylle a	ug/l	<2,5	2,5-10	10-30	30-110	>110

GRILLE DE QUALITE DES EAUX DESTINEES A LA PRODUCTION DE L'EAU POTABLE (NORMES MAROCAINES) (B.O N° 5062 DU 5.12.2002)

Catégorie		A1		A2		A3		
		G	I	G	I	G	I	
PARAMETRES ORGANOLEPTIQUES								
1	Couleur	mg pt/l	10	20	50	100	50	200
2	Odeur à 25°C		3	-	10	-	20	-
PARAMETRES PHYSICOCHIMIQUES								
3	Température	°C	20	30	20	30	20	30
4	pH	pH	6,5-8,5	-	6,5-9,2	-	6,5-9,2	-
5	Conductivité à 20°C	µs / cm	1300	2700	1300	2700	1300	2700
6	Chlorures (Cl ⁻)	mg/l	300	750	300	750	300	750
7	Sulfates (SO ₄)	mg/l	200	-	200	-	200	-
8	MES	mg/l	50	-	1000	-	2000	-
9	O ₂ dissous	mg/l	7(90%)	-	5(70%)	-	3(50%)	-
10	DBO ₅	mg/l	3	-	7	-	10	-
11	DCO	mg/l	-	-	25	-	40	-
12	Oxydabilité KmnO ₄	mg/l	2	-	5	-	10	-
SUBSTANCES INDESIRABLES								
13	Bore	mg/l	-	1	-	1	-	1
14	Ammonium	mgNH ₄ /l	0,05	0,5	1	1,5	2	4
15	NTK	mgN/l	1	-	2	-	3	-
16	Nitrates (NO ₃)	mg/l	-	50	-	50	-	50
17	Phosphores	mgP ₂ O ₃ /l	0,4	-	0,7	-	0,7	-
18	Baryum	mg/l	-	1	-	1	-	1
19	Cuivre (Cu)	mg/l	-	1	-	1	-	1
20	Zinc (Zn)	mg/l	-	5	-	5	-	5
21	Manganèse	mg/l	-	0,1	0,1	0,1	1	-
22	Fer dissous (Fe)	mg/l	-	0,3	1	2	1	3
23	Fluorures (F)	mg/l	0,7	1,5	0,7	1,5	0,7	1,5
24	Hydrocarbures dissous	mg/l	-	0,05	-	0,2	0,5	1
25	Phénols	mg/l	-	0,001	-	0,005	-	0,01
26	Détergents anioniques	mg/l	-	0,5	-	0,5	-	0,5
SUBSTANCES TOXIQUES								
27	Arsenic (As)	µg /l	-	50	-	50	-	100
28	Cadmium (Cd)	µg /l	1	5	1	5	1	5
29	Chrome total (Cr)	µg /l	-	50	-	50	-	50
30	Plomb (Pb)	µg /l	-	50	-	50	-	50
31	Mercuré	µg /l	-	1	-	1	-	1
32	Sélénium (Se)	µg /l	-	10	-	10	-	10
33	Nickel (Ni)	µg /l	-	50	-	50	-	50
34	Cyanures (CN ⁻)	µg /l	-	50	-	50	-	50
35	Pesticides par subst.	µg /l	-	0,1	-	0,1	-	0,1
36	Pesticides au total	µg /l	-	0,5	-	0,5	-	0,5
37	HPA	µg /l	-	0,2	-	0,2	-	0,2
PARAMETRES BACTERIOLOGIQUES								
38	Coliformes fécaux	/100ml	20	-	2000	-	20000	-
39	Coliformes totaux	/100ml	50	-	5000	-	50000	-
40	Streptocoques fécaux	/100ml	20	-	1000	-	10000	-

G : valeur guide

A1 : traitement physique simple et désinfection

I : valeur impérative

A2 : traitement normal physique chimique et désinfection

A3 : traitement physique chimique pousse affinage et désinfection

Tableau des normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation

(Normes marocaines) (B.O N° 5062 du 5.12.2002)

	Paramètres	Valeurs limites
PARAMETRES BACTERIOLOGIQUES		
1	Coliformes fécaux	5000/100 ml *
2	Salmonelle	Absence dans 51
3	Vibrion Cholérique	Absence dans 450 ml
PARAMETRES PARASITOLOGIQUES		
4	Parasites pathogènes	Absence
5	Œufs, Kystes de parasites	Absence
6	Larves d'Ankylostomides	Absence
7	Fluococercaires de Schistosoma hoematobium	Absence
PARAMETRES TOXIQUES		
8	Mercure (Hg) en mg/l	0,001
9	Cadmium (Cd) en mg/l	0,01
10	Arsenic (As)) en mg/l	0,1
11	Chrome total en mg/l	0,1
12	Plomb (Pb) en mg/l	5
13	Cuivre (Cu) en mg/l	0,2
14	Zinc (Zn) en mg/l	2
15	Sélénium (Se) en mg/l	0,02
16	Fluor (F) en mg/l	1
17	Cyanures (Cn) en mg/l	1
18	Phénols en mg/l	3
19	Aluminium (Al) en mg/l	5
20	Barilyum (Be) en mg/l	0,1
21	Cobalt (Co) en mg/l	0,05
22	Fer (Fe) en mg/l	5
23	Lithium en mg/l	2,5
24	Manganèse (Mn) en mg/l	0,2
25	Molybdène (Mo) en mg/l	0,01
26	Nickel (Ni) en mg/l	0,2
27	Vanadium (V) en mg/l	0,1

- 1.000 CF/100 ml pour les cultures consommées crues.