



UNIVERSITÉ SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH

FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES



LABORATOIRE DE GÉORESSOURCES ET ENVIRONNEMENT

## THESE

Pour l'obtention du diplôme de

## DOCTORAT

UFR : Chimie de l'Environnement

Discipline : Géologie

Option : Hydrologie - Environnement

# CARACTERISATION HYDROLOGIQUE ET QUALITATIVE DES EAUX DE SURFACE DU BASSIN VERSANT DU HAUT INAOUENE

Présentée par

*Jamal Naoura*

Soutenu le 04/01/2012, devant les membres de Jury :

Pr. Raouf Jabrane	FST Fès	Président
Pr. Lahcen Benaabidate	FST Fès	Directeur
Pr. Jamal Eddine Stitou El Messari	FS Tétouan	Rapporteur
Pr. Abdallah Dridri	FS Dhar el Mehraz Fès	Rapporteur
Pr. Abderrahim Lahrach	FST Fès	Rapporteur
Pr. Kawtar Fikri Benbrahim	FST Fès	Examineur
Pr. Abdel_Ali Chaouni	FP Taza	Examineur

## RESUME

La présente étude constitue une analyse multidisciplinaire, menée dans le bassin versant de l'Inaouène qui occupe la partie Est du bassin versant de Sebou, cumulant une superficie totale de 5184 Km<sup>2</sup> avec un périmètre de 374,2 Km, soit 12,92% de la surface du bassin versant du Sebou. Le secteur étudié est étendu, uniquement, sur une superficie de 2720 Km<sup>2</sup> et un périmètre 268 Km, soit 52,46% du bassin d'Inaouène, il s'agit du bassin versant d'Inaouène amont. L'étude a été entamée par une caractérisation morphométrique de la zone d'étude, suivie par une synthèse géologique et climatologique. Par la suite, une analyse du comportement hydrologique de l'Inaouène et de la qualité des différents compartiments aquatiques a été développée.

L'étude hydrologique a montré un régime typique méditerranéen, caractérisé par l'abondance pluviale à très forts débits hivernaux, donc des fortes crues, d'une part, et d'autre part, par une saison sèche fortement prononcée, donc des étiages. Le module annuel, ainsi que les différents coefficients, mettent en évidence des fluctuations hydroclimatiques, en relation avec un climat semi-aride conclu par la synthèse climatologique. Le bilan hydrologique a mis en évidence l'importance des volumes d'eau acheminés en amont qu'en aval, confirmant ainsi les paramètres morphométriques du bassin et la nature lithologique qui regroupe deux grandes unités différentes (formations essentiellement carbonatées Karstifiées du Moyen Atlas et un substratum marneux imperméable du pré-rif). L'étude fréquentielle des débits extrêmes a montré qu'ils ne sont pas régis par une loi déterminée.

Les eaux et les sédiments de surface de l'oued Inaouène ont été aussi le siège d'une étude qualitative qui a été élaborée en se basant sur deux campagnes d'échantillonnage. La concentration des éléments traces métalliques dans les sédiments révèlent qu'ils ne suscitent aucune préoccupation écologique, toutefois malgré la forte teneur en certains métaux lourds (Fe, Mn, Sr, Ni, Cu), l'origine naturelle l'emporte sur l'origine anthropique. D'autre part, les teneurs des métaux lourds dangereux (Ag, Cd, Hg) pour la santé publique, étaient au dessous de la limite de détection. La minéralogie est caractérisée par une répartition non uniforme, avec des fluctuations spatiotemporelles (de l'amont vers l'aval et d'une campagne à l'autre), ceci confirme l'impact des différences entre les aires nourricières.

Les résultats de l'étude physicochimique des eaux de surface d'oued Inaouène, ont révélé des teneurs relativement élevées en DCO et DBO<sub>5</sub> qui seraient dues principalement aux rejets domestiques liquides non contrôlés. Certains éléments majeurs ont, à leurs tours, affichés des teneurs élevées (Ca et Mg), elles sont attribuées à la nature géologique des terrains traversés, en l'occurrence, dans la partie amont du bassin versant. La teneur en quelques métaux lourds s'est révélée supérieure aux normes relatives, tels que le Fe, Mn et Ni, ce qui serait engendré aussi bien par quelques activités artisanales de la ville de Taza et aux rejets domestiques liquides. Par ailleurs, les métaux lourds, en plus de leurs origines éventuelles liées aux activités anthropiques, peuvent avoir une origine géologique. L'étude statistique des résultats par l'Analyse en Composante Principale (ACP), a montré une double originalité de la minéralisation. L'aptitude des eaux d'oued Inaouène, et ses affluents principaux, à l'irrigation est redoutable d'après les résultats de la conductivité obtenus in situ et les diagrammes de Riverside-Wilcox.

La qualité bactériologique des eaux d'oued Inaouène est douteuse, globalement la contamination fécale est récente, marquée par la présence d'*Escherichia Coli*. La charge microbienne est parfois intense, certains germes bactériologiques sont pathogènes pour l'homme et les animaux, notamment la *Salmonella* et les *Pseudomonas*. Les résultats statistiques de l'ACP, a montré une typologie spatiale et temporelle des variables (FMAT, CF, CT et SF).

**Mots clés :** Oued Inaouène, régime hydrologie, sédiments, pollution, métaux lourds, physico-chimie, ACP, Analyse fréquentielle, bactériologie.

## SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE .....	1
-----------------------------	---

### *Chapitre I : LES CARACTERISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES DU BASSIN VERSANT DE L'INAOUENE*

I.1 Introduction .....	4
I.2 - Présentation du bassin versant d'oued inaouene.....	4
I.2.1- Cadre Géographique Du Secteur D'étude .....	4
I.2.2- Cadre géomorphologique du secteur d'étude .....	5
I.3 - Caractéristiques morphométriques.....	6
I.3.1- Caractéristiques de la disposition dans le plan.....	6
I.3.1.1- Surface et périmètre.....	6
I.3.1.2- caractéristique de longueur :.....	7
I.3.1.3- caractéristique de forme.....	8
I.3.1.3.1-Indice de l'indice de compacité de Gravelius (1914) $K_G$ .....	8
I.3.1.3.2-indice de compacité de Horton .....	8
I.3.1.3.3- Le rectangle équivalent.....	9
I.3.1.3.4- Représentation triédrale .....	9
I.4 - Caractéristiques des altitudes (hypsométrie) .....	11 ✓
I.4.1- carte hypsométrique .....	11
I.4.2- Courbe hypsométrique .....	13
I.4.3- Temps de concentration .....	14
I.4.4 - Les indices de pente .....	15
I.4.4.1- La pente moyenne du bassin versant .....	15
I.4.4.2 - L'indice de pente de roche $I_p$ : .....	16
I.4.4.3- Indice de pente globale .....	17
I.4.4.4 - Dénivelée spécifique $D_s$ .....	18
I.5- Caractéristiques du réseau hydrographique.....	19
I.5.1- Densité de drainage .....	20
I.5.2- Coefficient de torrencialité .....	21
I.5.3- Hiérarchisation du réseau.....	21
I.5.4- Développement du réseau hydrographique selon les principaux sous bassins de l'Inaouène.....	22
I.5.5- Profil en long de l'oued Inaouène.....	23
I.6 Le couvert végétal.....	24

### *Chapitre II: LE CADRE GEOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT*

II.1 Introduction .....	27
II.2 Faciès litho-stratigraphiques .....	28
II.2.1- le domaine meseto-atlasique .....	29
II.2.1.1- Le Primaire .....	29
II.2.1.2. Le Secondaire .....	30
II.2.1.2.1 Dolomies et calcaires massifs (Lias inférieur) .....	31
II.2.1.2.2 Calcaires en dalles du Lias moyen (Carixien -Domérien).....	32
II.2.1.2.3- Marnes du Toarcien (ou Lias supérieur au sens large).....	33
II.2.1.2.4- Marnes et marno- calcaires de l'Aalénien - Bajocien .....	33
II.2.1.3 Le Tertiaire .....	34
II.2.1.4 Le Quaternaire .....	34

II.2.2 Le domaine Pré-rifain .....	35
II.3 Le Cadre structurale.....	36
II-3-1 Le domaine meseto-atlasique.....	36
II-3-2 Le domaine Rifain.....	39
II.4 Esquisse pédologique du bassin versant de l'Inaouène .....	40

### *Chapitre III : LA CLIMATOLOGIE*

III.1. Introduction .....	44
III.2. Les précipitations.....	45
III.2.1 Contrôles des données .....	46
III.2.2 Les variations temporelles des précipitations dans le bassin.....	47
III.2.2.1 Les précipitations annuelles .....	47
III.2.2.2 Les précipitations Saisonnières .....	49
III.2.2.3 Les précipitations mensuelles .....	50
III.2.2 Evaluation de la lame d'eau moyenne tombée sur le bassin .....	52
III.2.2.1 La moyenne arithmétique .....	52
III.2.2.2 : Méthode des isohyètes .....	53
III.2.2.3 Méthode des polygones de Thiessen .....	55
III.2.2.4 Estimation de la moyenne de la lame d'eau calculée par les trois méthodes .....	56
III.3. Etude des températures .....	57
III.3.1 Température moyenne mensuelle.....	57
III.3.2- Relation température et précipitation .....	58
III.3.2.1- L'indice Xérothermique de Gaussen .....	58
III.3.2.2 L'indice d'aridité de De Martonne et indices mensuels d'aridité. ....	60
III.3.2.3 Quotient pluviothermique d'Emberger .....	61
III.3.2.4. Indice de Stewart .....	63
III.4. Evapotranspiration .....	64
III.4.1- évapotranspiration de référence (ETP ou ET0) .....	64
III.4.2 évapotranspiration réelle (ETR).....	68
III.4.2.1 Méthode de Turc. ....	68
III.4.2.2 Méthode de Coutagne .....	69
III.4.2.3 Méthode du bilan de Thornthwaite .....	69
III.4.2.3.1 Principe du bilan .....	69
III.4.2.3.2 Bilan de la RFU .....	70
III.4. 3 Interprétation du bilan hydrique .....	71

### *Chapitre IV : CARACTERISATION HYDROLOGIQUE D'OUED INAOUENE*

IV.1 Introduction .....	74
IV.2. Les variations spatiale et temporelle des débits annuels .....	75
IV.2.1. Module annuel.....	75
IV.2.2 Méthodologie des écarts (Ec) des débits moyens annuels aux débits Moyens Interannuels.....	76
IV.2.3 L'irrégularité inter annuelle des modules .....	78
IV.2.3.1 Test de simple et double cumul .....	78
IV.2.3.2 Coefficients et indices de la variabilité des débits .....	79
IV.2.3.2.1 Coefficient d'hydraulicité .....	80
IV.2.3.2.2 Coefficient d'immodération.....	80
IV.2.3.2.3 Le coefficient de variation .....	81
IV.3 Utilisation des débits mensuels .....	81

---

IV.3.1 Module mensuel.....	81
IV.3.2 Intérêt du coefficient mensuel des débits.....	83
IV.4 Relation entre les précipitations et débits.....	84
IV.4.1 Relation entre les précipitations et débits mensuels.....	84
IV.4.2 Estimation du coefficient de ruissellement.....	85
IV.4.3 Estimation du bilan hydrologique.....	87
IV.4.3.1 Estimation du bilan hydrologique au niveau de la station de Bab Marzouka.....	88
IV.4.3.1.1- Ecoulement total.....	88
IV.4.3.1.2- Ruissèlement.....	88
IV.4.3.1.3- L'infiltration.....	89
IV.4.3.2 Estimation du bilan hydrologique au niveau de la station Elkouchate.....	89
IV.4.3.2.1- Ecoulement total.....	89
IV.4.3.2.2- Ruissèlement.....	90
IV.4.3.2.3- L'infiltration.....	90
IV.5 Etude des débits Journaliers.....	91
IV.5.1 Etude des débits Journaliers à la station de Bab Marzouka.....	91
IV.5.2 Etude des débits Journaliers à la station d'Elkouchate.....	93
IV.5.3 Courbes des débits classés.....	95
IV.6- Etude de situations hydrologiques particulières : Les crues et les étiages.....	97
IV.6.1 Les crues.....	97
IV.6.1.1 Etude des débits maxima instantanés annuels de l'Inaouène.....	98
IV.6.1.2 Puissance des crues.....	99
IV.6.1.3 Analyse fréquentielle des crues maximales annuelles.....	101
IV.6.1.3.1 Vérification des hypothèses.....	102
IV.6.1.3.1.1- Test d'homogénéité de Mann Whitney.....	103
IV.6.1.3.1.2 Test d'indépendance de Wald Wolfowitz à 5%.....	104
IV.6.1.3.1.3 Test de stationnarité (Kendall).....	106
IV.6.1.3.2 Données et méthode.....	107
IV.6.1.3.3 Les statistiques de base.....	107
IV.6.1.3.3.1- Résultats des statistiques de base.....	107
IV.6.1.3.3.2- Les histogrammes de fréquences.....	109
IV.6.1.3.3.3- courbes chronologiques des sommes cumulatives (ou méthode de Cusum).....	109
IV.6.1.3.4- Résultats et interprétation des ajustements aux lois statistiques.....	110
IV.6.1.3.4.1- Résultats de comparaison des ajustements aux lois statistiques.....	110
IV.6.1.3.4.2- Ajustement à la loi de Gumbel (méthode de vraisemblance).....	111
IV.6.1.3.4.3- Ajustement à la loi de Jenkinson GEV (Méthode des moments pondérés).....	113
IV.6.1.3.4.4- Ajustement à la loi Gamma (ou Pearson).....	115
IV.6.1.3.4.5- Ajustement à la loi de Log-Pearson III (méthode des moments).....	116
IV.6.1.3.5.-Quantiles estimés pour différentes périodes de retour.....	117
IV.6.2- Les étiages.....	120
IV.6.2.1 Etude des fréquences annuelles de basses eaux et étiages du bassin versant de l'oued Inaouène au niveau de la station de Bab Marzouka et celle d'Elkouchate.....	120
IV.6.2.2. Analyse fréquentielle des étiages.....	122
IV.6.2.2.1 Test des hypothèses.....	123
IV.6.2.2.1.1-Test d'homogénéité à l'échelle annuelle (Wilcoxon).....	123
IV.6.2.2.1.2- Test d'indépendance de Wald Wolfowitz à 5%.....	123
IV.6.2.2.1.3- Test de stationnarité (Kendall).....	124
IV.6.2.2.2 Les statistiques de base.....	125

IV.6.2.2.2.1-Résultats des statistiques de base.....	125
IV.6.2.2.2.2- Histogrammes de fréquences.....	125
IV.6.2.2.2.3 Courbes chronologiques des sommes cumulatives (ou méthode de Cusum).....	126
IV.6.2.2.3 Résultats et interprétation des ajustements aux lois statistiques.....	126
IV.6.2.2.3.1- Résultats de comparaison des ajustements aux lois statistiques....	126
IV.6.2.2.3.2- Ajustement des données de Bab Marzouka .....	128
IV.6.2.2.3.3- Ajustement des données d'Elkouchate.....	130
IV.6.2.2.4- Quantiles des débits d'étiage estimés pour différentes périodes de retour .....	132

*Chapitre V : MATERIELS ET METHODES DES ANALYSES SEDIMENTAIRES, PHYSICOCHIMIQUES ET BACTERIOLOGIQUES*

V. 1 Echantillonnage.....	137
V.1.1 Les sites de prélèvement.....	137
V.1.2 Les périodes de prélèvement .....	139
V.1.2.1 Les périodes de prélèvement pour les sédiments .....	139
V.1.2.2 Les périodes de prélèvement pour les analyses physicochimiques des eaux de surface d'oued Inaouène et ses affluents.....	139
V.1.2.3 Les périodes de prélèvement pour les analyses bactériologiques .....	140
V. 1.3 Prélèvement, Filtrations et conservation des échantillons.....	140
V.2 Matériels et méthodes.....	141
V.2.1. Analyses physico-chimiques.....	141
V.2.1.1 La température :.....	141
V.2.1.2. Le pH.....	142
V.2.1.3. La conductivité électrique (CE) .....	142
V.2.1.4. La dureté.....	142
V.2.1.5 La Turbidité.....	142
V.2.1.6 Demande chimique en oxygène(DCO) .....	143
V.2.1.7 Demande biochimique en oxygène(DBO <sub>5</sub> ).....	143
V.2.1.8 Les composés azotés .....	143
V.2.1.9 Les composées phosphorées.....	144
V.2.1.10 Les sulfates et les sulfures d'hydrogène.....	144
V.2.2 Détermination de la minéralogie par la méthode de la diffractométrie par RX... 145	145
V.2.2.1 Principe de la méthode de diffractométrie sur poudre à compteur.....	145
V.2.2.2 Le générateur de rayons X.....	146
V.2.2.3 Le spectromètre de poudres .....	146
V.2.2.4 L'informatique de commande .....	147
V.2.3 Analyse des éléments traces par spectrométrie de masse couple à un plasma induit (ICPMS).....	147
V.2.3.1 Principe de l'ICP .....	148
V.2.3.2 Les interférences.....	149
V.2.3.3 Préparation des échantillons, des solutions étalons et des blancs .....	149
V.2.3.4 Limites de détection et de quantification. ....	150
V.2.4 Analyse bactériologique .....	151
V.2.4.1 Réalisation des dilutions .....	151
V.2.4.2 Le dénombrement direct par numération des colonies sur ou dans une gélose nutritive .....	151
V.2.4.3 Le dénombrement direct des colonies après concentration par filtration sur une membrane .....	152

V.2.4.4 comptage de colonies .....	154
V.2.4.5 Identification des colonies.....	154

*Chapitre VI: GEOCHIMIE ET MINERALOGIE DES SEDIMENTS DE SURFACE  
D'OUED INAOUENE*

VI.1. Introduction .....	158
VI.2 Généralités sur les métaux lourds dans l'environnement aquatique. ....	159
VI.2.1 - La complexation .....	161
VI.2.2 - L'adsorption ou la sorption.....	161
VI.2.3 - La désorption .....	162
VI.2.4 - Les réactions d'oxydoréduction .....	162
VI.2.5 - Conditions de remobilisation des éléments métalliques .....	163
VI.2.6. Sources de pollution des métaux lourds .....	164
VI.3 Résultats et discussion des études géochimique des éléments métalliques analysés. ....	164
VI.3.1 La serie 1 (Fe, Sr, Mn, Zn, Rb, Pb) .....	165
VI.3.1.1. Le Fer .....	166
VI.3.1.2. Le Manganèse (Mn).....	167
VI.3.1.3. Le Strontium (Sr) .....	168
VI.3.1.4. Le Rubidium (Rb).....	170
VI.3.1.5. Le Plomb (Pb) .....	171
VI.3.1.6. Le Zinc .....	172
VI.3.2. La serie 2 (Cu, Ni, As, Sn, Co, Cr, Au, Pt) .....	174
VI.3.2.1.L'Arsenic (As) .....	175
VI.3.2.2 Le Cuivre (Cu) .....	177
VI.3.2.3 Le Nickel (Ni).....	178
VI.3.2.4.Le Chrome (Cr) .....	180
VI.3.2.5 L'Etain (Sn).....	181
VI.3.2.6 Le Cobalt (Co) .....	182
VI.3.2.7. Le Platine (Pt) et L'Aurum (Au) .....	183
VI.3.3- Relation entre les teneurs des éléments métalliques par l'application de l'analyse en composante principale (L'ACP).....	184
VI. 4 Interprétation des résultats d'analyse minéralogique des sédiments superficiels d'oued Inaouène par diffraction aux rayons X.....	188
VI. 4.1 Répartition des minéraux dans les sédiments des sites échantillonnés .....	188
VI. 4.2 Détermination des pourcentages semi-quantitative des minéraux détectés .....	194
VI.5-Conclusion .....	197

*Chapitre VII : CARACTERISATION QUALITATIVE PHYSICOCHEMIQUE DES EAUX  
D'OUED INAOUENE*

VII-1 Introduction .....	199
VII.2 Résultats et discussions des analyses des paramètres physicochimiques .....	200
VII.2 .1 La température .....	200
VII.2.2 Conductivité.....	201
VII.2.3 Le potentiel d'hydrogène (pH) .....	202
VII.2.4 La Turbidité .....	203
VII.2.5 Les cations majeurs .....	204
VII.2.5.1 Les cations sujet de la dureté totale .....	204
VII.2.5.2 Les autres cations majeurs .....	206
VII.2.5.2.1 Le Sodium (Na <sup>+</sup> ) .....	206

VII.2.5.2.2 Le Potassium (K <sup>+</sup> ) .....	207
VIII.2.5.2.3 L'Aluminium (Al <sup>3+</sup> ) .....	208
VII.2.6 Les éléments nutritifs .....	209
VII.2.6.1 Les composés azotés .....	209
VII .2.6.1.1- L'Ammonium .....	209
VII.2.6.1.2 Les Nitrites .....	211
VII .2.6.1.3 Les Nitrates .....	212
VII .2.6.2 Les Phosphates.....	213
VII.2.6.3 Les Sulfates.....	214
VII.2.7 Demande chimique en oxygène(DCO).....	216
VII.2.8 Demande biochimique en oxygène(DBO <sub>5</sub> ) .....	217
VII.2.9 Intérêt du rapport entre DCO/DBO <sub>5</sub> .....	219
VII.2.10 Comparaison des paramètres physicochimiques d'oued Inaouène et oued Lebène.....	220
VII.2.11 Etat de la qualité physicochimiques d'oued inaouène.....	222
VII.2.12 Résultats des éléments traces (Métaux lourds) .....	224
VII.2.12.1 Le Fer (Fe) .....	225
VII.2.12.2 Le Nickel(Ni) .....	225
VII .2.12.3 Le Titane(Ti) .....	226
VII.2.12.4 Le Manganèse (Mn) .....	227
VII.2.12. 5 Le Silicium (Si).....	228
VII.3 Relation entre les paramètres physicochimiques par l'analyse en composante principale (L'ACP).....	229
VII.3.1 Les relations entre les cations majeurs et éléments métalliques .....	229
VII.3.1.1 La matrice et cercle de corrélation .....	229
VII.3.1.2 Carte de représentation des sites échantillonnés .....	231
VII.3.2 Les relations entre les anions et les paramètres physiques.....	231
VII.3.2.1 La matrice et cercle de corrélation .....	231
VII .3.2.2 Carte de représentation des sites échantillonnés .....	232
VII.4 -Aptitude des eaux à l'irrigation .....	233
VII.4.1 La Conductivité.....	233
VII.4.2 Capacité d'absorption du sodium (SAR : Sodium Absorption Ratio).....	234
VII.5 Conclusion .....	238

*Chapitre VIII: EVALUATION DE LA QUALITE BACTERIOLOGIQUE DES EAUX DE  
SURFACE D'OUED INAOUENE*

VIII.1 Introduction .....	240
VIII.2 Les types des bactéries indicatrices de contamination à identifier.....	241
VIII.2.1 La flore mésophile aérobie totale (FMAT).....	242
VIII.2.2 Les coliformes totaux (CT).....	242
VIII.2.3 Les coliformes thermotolérants (CF) .....	243
VIII.2.4 Les streptocoques fécaux(SF) .....	244
VIII.4 Résultats et discussion .....	246
VIII.3 .1- Etude de l'évolution spatiotemporelle des différentes populations bactériennes .....	247
VIII.3.1.1- Les germes indicateurs de pollution : .....	247
VIII.3.1.1.1- La Flore mésophile aérobie totale (FMAT) .....	247
VIII.3.1.1.2- Les coliformes totaux.....	248
VIII.3.1.2 Les germes témoignant d'une contamination fécale .....	249



---

VIII.3.1.2.1- Les coliformes fécaux .....	249
VIII.3.1.2.2- Les streptocoques fécaux .....	250
VIII.3.2 Etat de la qualité bactériologique des eaux d'oued Inaouène. ....	252
VIII.3.3 Résultat d'identification des coliformes .....	253
VIII.3.4 Relation entre les types de bactéries analysées déterminée par l'analyse en composante principale (L'ACP).....	255
VIII.3.4.1 La matrice de corrélation entre les types de bactéries analysées .....	255
VIII.3.4.2 Représentation des types de bactéries sur le cercle de corrélation .....	256
VIII.3.4.3 Carte de représentation des sites échantillonnés .....	258
VIII.3.4.4- Origine de la contamination fécale .....	260
VIII.5 Conclusion .....	261
CONCLUSION GENERALE.....	262
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	265