



UNIVERSITE SULTAN MOULAY SLIMANE FACULTÉ DES
SCIENCES ET TECHNIQUES BÉNI MELLAL



Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques
Formation Doctorale : Ressources Naturelles, Environnement et Santé
(RNES)

THÈSE

Présentée par

Hanane EL-HALOUANI

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR

Spécialité : Biologie appliquée à l'environnement

Option : Sciences de l'eau

**ETUDE DES RESSOURCES EN EAU DANS LA PLAINE DU
TADLA : IMPACT DE LA POLLUTION AGRICOLE SUR LA
QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES (PHYSICO-CHIMIE,
MICROBIOLOGIE, ET ECOTOXICOLOGIE)**

Soutenue publiquement le 09/07/ 2019 devant le jury

Président : Pr. Khalid HABBARI, Faculté des Sciences et Techniques – Béni Mellal

Examinatrice: Pr. Nadra LEKOUCH, Faculté des Sciences et Techniques – Béni Mellal

Rapporteur : Pr. Soumaya HAMMADA, Faculté des Sciences et Techniques – Béni Mellal

Rapporteur : Pr. Azeddine SEDKI, Faculté des Sciences Semlalia – Marrakech

Rapporteur: Pr. Abdelali BOULLI, Faculté des Sciences et Techniques – Béni Mellal

Directeur de thèse : Pr. Zehor AIT YACINE, Faculté des Sciences et Techniques – Béni Mellal

Co-Directeur de thèse : Pr. Aziz HASIB, Faculté des Sciences et Techniques – Béni Mellal

Equipe Génie de l'Environnement, département science de vie, FST de Béni Mellal

Dédicace

A mon père **Abdeslam**, L'exemple de patience, de courage, de sacrifice et de support, cher père je me rappelle toujours de tous les moments où tu m'a poussé à travailler et à réussir, je me rappelle aussi que c'était toi qui m'a poussé à terminer mes études et de faire le cycle doctorat, que je suis fière de l'avoir choisir comme carrière, cher père j'avoue que si je suis devenue docteur aujourd'hui c'est grâce à tes efforts, à tes conseils et à ta surveillance. Que Dieu te garde, te protège et t'accorde une longue vie.

A ma mère **Naima**. Ma très chère mère, j'aimerais toujours te remercier pour tous ce que tu as fait jusqu'à notre jours-là pour assurer l'éducation et la formation de tous tes enfants, je me rappelle vraiment de tous tes efforts avec moi dès mon jeune âge, chère mère j'avoue que tu été pour moi la lumière qui me guide mes routes et qui m'emmène aux chemins de la réussite. Merci maman pour ton amour et pour tous les sacrifices que tu as faits pour moi. Que Dieu te garde, te protège et t'accorde une longue vie.

Mes chers parents, tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour que je vous porte, ni la profonde gratitude que je vous témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que vous m'avez accordés. Je mets entre vos mains le fruit de longues années d'étude.

A mon mari **Ahmed**, aucun mot ne saurait t'exprimer mon profond attachement et ma reconnaissance pour l'amour, la gentillesse et la tendresse dont tu m'as toujours entouré, cher mari j'aimerais bien que tu trouves dans ce travail l'expression de mes sentiments de reconnaissance les plus sincères pour ton soutien moral et affectif sans faille, ta présence, tes encouragements, et pour la très grande patience dont tu as su faire preuve. Que Dieu te garde, te protège et t'accorde une longue vie.

A mon très cher petit **Saif Abdessalam**, c'est à toi mon adorable ange, ma joie, mon petit trésor que maman dédie ce travail pour te dire que tu resteras pour toujours le rayon du soleil qui égaye ma vie. Je t'aime mon bébé et je te souhaite tous le bonheur du monde. Que Dieu te garde, te protège et t'accorde une longue vie.

A mes chers frères **Omar** et **Amal**, En reconnaissance de vos encouragements et de votre soutien moral et matériel. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'estime, le respect et la profonde fraternité que je porte pour vous, je vous souhaite tout le bonheur du monde. Que Dieu vos garde, vos protège et vos accorde une longue vie.

A toute ma famille et à tous mes amis pour leur aide et leur soutien moral durant l'élaboration de ce travail.

A tous ceux qui m'ont aidé.

Remerciements

Si cette thèse a pu voir le jour, c'est grâce à l'appui et le soutien de très nombreuses personnes, à leur égard on ne peut être que reconnaissant.

Ce n'est pas qu'il est difficile de remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à ce travail, mais il faut avouer que les formules sont nombreuses et que le choix des bons mots été pour moi difficile.

Je commencerais sincèrement par remercier Monsieur le doyen de la faculté des sciences et techniques béni Mellal, mes remerciements vont également aux membres de jury, qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir juger ce travail, et d'assister à la soutenance de ma thèse. Je tiens tout d'abord à remercier Pr. **Khalid HABBARI**, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques, Béni Mellal, d'avoir accepté de présider le jury. Je remercie également Pr. **Soumaya HAMMADA**, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques Béni Mellal, Pr. **Azeddine SEDKI**, Professeur à la faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, et Pr. **Abdelali BOULLI**, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques Béni Mellal, d'avoir accepté de juger ce travail en tant que rapporteurs. Je tiens à remercier également Pr. **Nadra LEKOUCH**, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques Béni Mellal, d'avoir accepté d'examiner ce travail. Merci pour le temps accordé, pour vos remarques pertinentes et constructives qui ont données de pour la valeur ajoutée à ce travail.

Je souhaiterais exprimer ma plus profonde gratitude à ma directrice de thèse, Pr. **Zehor AIT YACINE**, professeur à la Faculté des Sciences et Techniques, Béni Mellal, pour avoir accepté de me prendre sous son aile. Son encadrement, son suivi, ses conseils et ses encouragements ont toujours été pour moi un grand soutien moral et m'ont aidé à obtenir mon diplôme de licence et poursuivre mes études doctorales. J'ai apprécié tout le long de l'élaboration de ce travail ses qualités humaines et professionnelles. Merci Madame pour les nombreuses années où vous avez porté de nombreuses casquettes, professeur, encadrante, directrice, amie et maman. Quoique je vous adresse ma gratitude, ça ne sera pas suffisant pour vous exprimer toute ma grande reconnaissance pour la confiance et le grand soutien et disponibilité que vous m'avez accordé pour réaliser ce travail. Votre encouragement pour ma participation à de nombreuses manifestations internationales et nationales m'ont enrichie et m'ont donné de l'assurance.

J'adresse également mes profonds remerciements à mon co-encadrant Pr. **Aziz HASIB**, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques Béni Mellal, pour vouloir co-diriger mes travaux. Malgré ses énormes occupations au laboratoire, il m'a consacré énormément de temps pour me transmettre une partie de son savoir de chimiste. Sans pour autant oublier cette occasion pour lui adresser mes remerciements sur sa grande compréhension, respect et humanité.

Je remercie le directeur et le personnel de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole de Tadla (ORMVAT), en particulier Monsieur **Boundi** et Monsieur **Mouradi** pour leurs conseils et leurs soutiens. Que Monsieur **Cherif sidi Mouh** ainsi que tout le personnel de la station des expérimentations d'Ouled Gnaou trouvent ici l'expression de mes remerciements, pour m'avoir accompagné sur le terrain malgré leurs responsabilités et leurs diverses préoccupations.

Liste des abréviations

- ABHOER : Agence du Bassin Hydraulique de l'Oum Er-Rbia
- ACP : Analyse en Composantes Principales
- AEP : Approvisionnement en eau potable
- AFNOR : Association française de normalisation
- CE : Conductivité électrique
- DBO5 : Demande biologique en oxygène
- DCO : Demande chimique en oxygène
- MO : Matière Organique
- DGH : Direction Générale de l'Hydraulique
- ETM : Eléments Traces Métalliques
- VMA : Valeur Marocaine Admissible
- NM : Norme Marocaine
- NPK : Azote-Phosphore-Potassium
- OMS : Organisation Mondiale de la Santé.
- ORMVAT : Office Régionale de la Mise en Valeur Agricole de Tadla
- PT : Phosphore Totale
- PDAIRE : Plan Directeur d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau
- SAR : Ratio d'Adsorption du Sodium
- SIG : Système d'Information Géographique
- UFC /100 ml : Unité formant colonies par 100 millilitre
- RU : Reserve Utilisable
- RFU : Reserve Facilement Utilisable
- ETR : EvapoTranspiration Réelle
- ETP : EvapoTranspiration Potentielle

Sommaire

Dédicace.....	1
Remerciements.....	2
Liste des abréviations.....	3
Liste des figures.....	9
Liste des tableaux.....	11
Résumé.....	12
Abstract.....	13
ملخص.....	14
INTRODUCTION GENERALE.....	15
<i>PARTIE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE</i>	18
A. GENERALITES SUR LES EAUX.....	19
I. Contexte général.....	19
II. Les activités polluantes des eaux.....	19
III. Les problèmes liés aux activités agricoles.....	20
III. 1. Les facteurs déterminants la qualité des eaux d'irrigation.....	21
a. La conductivité électrique (CE).....	21
b. Le Ratio d'Adsorption du Sodium par le sol (SAR).....	22
IV. Normes de qualité des eaux pour les minéraux.....	24
IV. 1. Normes de qualité des eaux potables.....	24
a. Normes de qualité des eaux potables selon l'OMS.....	24
b. Normes marocaines de qualité des eaux potables.....	26
IV. 2. Normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation.....	26
a. Normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation selon l'OMS.....	26
b. Normes marocaines de qualité des eaux destinées à l'irrigation.....	27
B. LES EAUX DANS BENI MELLAL-KHENIFRA.....	28
I. Evaluation des ressources en eau.....	28
II. Ressources en eaux dans la région.....	29
II.1. Eaux de surfaces.....	29
II.2. Etat de mobilisation des ressources en eau superficielles.....	29
II.3. Eaux souterraines.....	30
a. Les bilans des eaux souterraines.....	32
III. Qualité des ressources en eau souterraines.....	33

III.1.	Evaluation et projection des besoins en eau.....	35
a.	Besoins d'alimentation en eau potable.....	35
b.	Besoins en eau d'irrigation.....	36
b.1.	Les prélèvements pour l'irrigation dans les Béni-Moussa	36
b.2.	Les prélèvements pour l'irrigation dans les Béni-Amir	36
C.	POLLUTION DES EAUX DANS LA PLAINE DE TADLA	36
I.	Généralités sur la pollution	36
I.1.	Définition	36
II.	Sources des pollutions par secteur dans la plaine du Tadla.....	37
II.1.	Pollutions domestiques.....	37
II.2.	Pollution d'origine industrielle	38
II.3.	Pollution d'origine agricole.....	39
II.4.	Pollution par les déchets solides	40
III.	Impacts de la pollution des eaux.....	40
III.1.	Impacts sur la santé	41
III.2.	Impact sur l'environnement	41
IV.	Mesures prises pour la protection des ressources en eau.....	41
IV.1.	Cadre législatif	41
D.	LES NITRATES : ORIGINE ET IMPACT SUR LA SANTE HUMAINE ET SUR L'ENVIRONNEMENT	43
I.	Contexte général.....	43
II.	Origine des nitrates	44
III.	Impacts des nitrates sur la santé et sur l'environnement	45
III.1.	Impact sur la santé humaine	45
III.2.	Impact des nitrates sur l'environnement	46
IV.	Travaux antérieurs sur la pollution nitrique des eaux souterraines au Maroc	47
E.	LYSIMETRE	48
I.	Contexte général.....	48
II.	Historique	48
III.	Principe du lysimètre	49
IV.	Les types de lysimètres, avantages et inconvénients.....	50
V.	Utilisation et objectifs scientifiques	51
F.	POLLUTION PAR LES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES	53
I.	Généralités sur les éléments traces métalliques	53

II.	Origines des métaux lourds	54
II.1.	Origine naturelle.....	54
II.2.	Origine anthropiques	54
III.	Phénomène de la bioamplification ou bioaccumulation.....	55
IV.	La phytoremédiation.....	55
V.	Les métaux et l'eau d'irrigation.....	56
VI.	Les métaux lourds et la santé humaine.....	56
VII.	Les métaux lourds et l'environnement	58
<i>PARTIE II : ASPECT GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE ET MATERIEL & METHODES.</i>		59
CHAPITRE I : PRESENTATION DU SITE D'ETUDE.....		60
I.	Description de la plaine de Tadla.....	60
I.1	Cadre géographique	60
I.1.1.	Localisation et production agricole de la zone d'étude	60
I.2	Cadre géologique	63
I.3	Cadre Hydrologique	68
I.4	Cadre Hydrogéologique de la plaine de Tadla.....	70
I.4.1.	Les nappes phréatiques du Tadla.....	70
I.4.1.1	La nappe phréatique du périmètre de Béni Amir	71
I.4.1.2	Nappe de Béni Moussa.....	72
I.4.2.	Les nappes profondes du Tadla	74
I.4.2.1	Nappe de l'Eocène	74
I.4.2.2	L'aquifère du Sénonien.....	76
I.4.2.3	L'aquifère du Turonien	78
I.5	Cadre climatologique	81
I.6.1	Les précipitations.....	82
I.6.2	Température.....	83
I.6.3	Diagramme ombrothermique.....	84
I.6.4	Indice d'aridité	84
I.6.5	Evaporation.....	85
I.6.6	Evapotranspiration.....	86
I.6.6.1	Evapotranspiration potentielle ETP	86
I.6.6.2	Evapotranspiration réelle ETR.....	87
I.6.7	Les vents	89

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES.....	90
I. Echantillonnage, conservation et transport	90
I.1. Méthode d'échantillonnage.....	90
I.2. Conservation et transport des échantillons.....	91
I.3. Mesures sur le terrain	91
II. Méthodes d'analyse des échantillons	91
II.1. Analyses des paramètres physico-chimiques	91
II.2. Analyse bactériologique.....	96
II.3. Dosages des métaux lourds (ETM) par Spectrométrie d'Emission Atomique Couplée à un Plasma Induit (ICP-AES)	96
II.3.1. Principe et fonctionnement.....	97
II.3.2. Les avantages de l'ICP	97
III. Traitement des données	97
III.1. Traitement statistique des données.....	97
III.2. Système d'information géographique	97
<i>PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS</i>	98
CHAPITRE I : VARIATION SPATIOTEMPORELLE DES DIFFERENTS PARAMÈTRES ANALYSESDES EAUX SOUTERRAINES DE LA PLAINE DE TADLA.....	99
I. Résultats des paramètres physicochimiques	99
I.1. La température	99
I.2. Le pH.....	100
I.3. Niveau piézométrique	102
I.4. Conductivité électrique	103
I.5. Oxygène dissous.....	104
I.6. La Demande Chimique en Oxygène (DCO)	105
I.7. Demande biochimique en oxygène (DBO5)	107
I.8. Matières Organiques (MO)	107
I.9. Nitrate NO ₃ ⁻	108
I.10. Nitrites NO ₂ ⁻	111
I.11. Azote ammoniacal NH ₄ ⁺	112
I.12. Sodium Na ⁺	113
I.13. Calcium Ca ²⁺	115
I.14. Magnésium Mg ²⁺	116
I.15. Résultat du SAR.....	116

I.16. Potassium K ⁺	118
II. Variation des teneurs métalliques (en mg/l) des eaux souterraines de la plaine de Tadla	119
III. Variation spatiotemporelle relatives aux contaminations bactériologiques des eaux souterraines de la plaine de Tadla.....	124
IV. Traitement statistique des résultats.....	125
Chapitre II : les essais lysimétriques dans la station d'Ouled Gnaou	129
I. Introduction	129
II. Matériel et méthodes	129
II.1. Les lysimètres.....	129
II.2. Classification pédologique	131
II.3. Les données météorologiques	131
III. Résultats et discussions	132
III.1. Les agrumes	132
III.1.1. Qualité des percolats	132
III.2. Pomme de terre	135
III.2.1. Qualité des percolats	136
IV. Conclusion	138
CONCLUSION GENERALE	139
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	142
ANNEXES	153

Liste des figures

Figure 1: composition du complexe aquifère de Tadla (coupe verticale) [55] (avec SO : Sud Ouest ; NE Nord Est)	31
Figure 2: Schéma de processus d'ammonification et nitrification [88]	44
Figure 3: schéma de principe d'un lysimètre [120].....	49
Figure 4: Situation géographique de la zone d'étude et points d'échantillonnage.....	63
Figure 5: Schéma géologique de la Plaine de Tadla (Extrait de la carte géologique de Rabat à 1/500000)	65
Figure 6: Log synthétique des formations géologique de la plaine de Tadla [160].....	67
Figure 7: Réseau hydrographique couvrant la Plaine du Tadla	68
Figure 8: Nappes phréatiques de la Plaine du Tadla (d'après la carte des aquifères de la zone d'action de l'ABHOE).....	71
Figure 9: Carte piézométrique de la nappe phréatique du Mio-Plio-Quaternaire de Tadla [161]	73
Figure 10 : Carte piézométrique de la nappe profonde de l'Eocène de Tadla	75
Figure 11: Carte piézométrique de la nappe profonde du Sénonien de Tadla	77
Figure 12: Carte d'évolution de la piézométrie de la nappe du Turonien.....	79
Figure 13: Précipitations moyennes mensuelles de la plaine (1970-2015).....	82
Figure 14 : Cumuls pluviométriques annuels de la plaine de Tadla (1970 à 2015).....	82
Figure 15: Températures moyennes minimales et Maximales de la plaine (1970-2015)	83
Figure 16: Températures moyennes minimales et Maximales de la plaine (1970-2015)	84
Figure 17: Indice d'aridité de Martonne de la plaine de Tadla	85
Figure 18: Moyenne de l'évaporation de la plaine (1970-2015).....	85
Figure 19: Bilan de Thornthwaite, entre 1985 et 2016 [161].....	88
Figure 20: Variations des moyennes mensuelles de Vent (1970-2015).....	89
Figure 21: Localisation géographique des puits objets de l'étude	90
Figure 22: Variation spatiale de la température des eaux souterraines de la plaine de Tadla	100
Figure 23: Variation spatiale du pH des eaux souterraines de la plaine de Tadla.....	101
Figure 24: Variation spatiale du Niveau Statique des eaux souterraines de la plaine de tadla	102
Figure 25 : Variation spatiale de la conductivité électrique des eaux souterraines de la plaine de Tadla	103
Figure 26: Variation spatiale de l'Oxygène dissous des eaux souterraines de la plaine de Tadla	105
Figure 27: Variation spatiale de la DCO des eaux souterraines de la plaine de Tadla	106
Figure 28: Variation spatiale de la DBO5 des eaux souterraines de la plaine de Tadla	107
Figure 29: Variation spatiale de la MO des eaux souterraines de la plaine de Tadla	108
Figure 30: Variation spatiale des nitrates des eaux souterraines de la plaine de Tadla	109
Figure 31: Variation spatiale des nitrites des eaux souterraines de la plaine de Tadla	111
Figure 32: Variation spatiale de l'azote ammoniacal des eaux souterraines de la plaine de Tadla.....	113
Figure 33: Variation spatiale de sodium des eaux souterraines de la plaine de Tadla.....	114
Figure 34: Variation spatiale de calcium des eaux souterraines de la plaine de Tadla	115

Figure 35: Variation spatiale de magnésium des eaux souterraines de la plaine de Tadla	116
Figure 36: Variation spatiale du SAR des eaux souterraines de la plaine de Tadla.....	117
Figure 37: Variation spatiale de potassium (mg /l) des eaux souterraines de la plaine de Tadla	118
Figure 38: Variation spatiale des teneurs d'Aluminium (en mg/l) des eaux souterraines de la plaine de Tadla	119
Figure 39: Variation spatiale des teneurs de Cuivre (en mg/l) des eaux souterraines de la plaine de Tadla	120
Figure 40: Variation spatiale des teneurs de Fer (en mg/l) des eaux souterraines de la plaine de Tadla.....	120
Figure 41: Variation spatiale des teneurs de Manganèse (en mg/l) des eaux souterraines de la plaine de Tadla	121
Figure 42: Variation spatiale des teneurs de Zinc (en mg/l) des eaux souterraines de la plaine de Tadla	122
Figure 43: Variation spatiale des teneurs de Nickel (en mg/l) des eaux souterraines de la plaine de Tadla	122
Figure 44: Variation spatiale des teneurs de Lithium (en mg/l) des eaux souterraines de la plaine de Tadla	123
Figure 45: Variation spatiale des teneurs de Plomb (en mg/l) des eaux souterraines de la plaine de Tadla	123
Figure 46: Plan factoriel PC1-PC2.....	125
Figure 47: contribution des variables à la formulation des composantes	126
Figure 48: Classification des variables.....	127
Figure 49: Corrélation des échantillons avec les variables	128
Figure 50: la sole des agrumes et la sole des pommes de terre.....	130
Figure 51: L'installation des lysimètres.....	130
Figure 52: le tuyau et la pompe utilisés pour l'évacuation des percolats	131
Figure 53: variation mensuelle de la DCO dans l'eau de drainage à différentes profondeurs	133
Figure 54: variation mensuelle de l'Azote ammoniacal dans l'eau de drainage à différentes profondeurs.....	133
Figure 55: variation mensuelle des Nitrates dans l'eau de drainage à différentes profondeurs	134
Figure 56: variation mensuelle des nitrites dans l'eau de drainage à différentes profondeurs	134
Figure 57: variation mensuelle de la DCO dans l'eau de drainage à différentes profondeurs.....	136
Figure 58: variation mensuelle de l'Azote ammoniacal dans l'eau de drainage à différentes profondeurs.....	136
Figure 59: variation mensuelle des nitrates dans l'eau de drainage à différentes profondeurs	137
Figure 60: variation mensuelle des nitrites dans l'eau de drainage à différentes profondeurs	137
Figure 61: Les diagrammes ombrothermiques des années 1970-2015	154

Liste des tableaux

Tableau 1: Gammes générales pour la tolérance de plante pour salinité de sol [53]	21
Tableau 2: Classification des eaux d'irrigation proposée par USDA	22
Tableau 3: Classement de la qualité de l'eau en fonction du danger d'alcalinisation du sol (SAR) [58].....	23
Tableau 4: Les directives pour l'interprétation d'une eau d'irrigation selon la FAO [60]	24
Tableau 5: Les directives de l'OMS en ce qui concerne la qualité de l'eau potable [61]	25
Tableau 6: Les normes marocaines de la qualité de l'eau potable [62]	26
Tableau 7: Qualité de l'eau servant à l'irrigation selon l'OMS ([63] ; [64] ; [65])	27
Tableau 8: Normes marocaines de la qualité de l'eau servant à l'irrigation [66]	28
Tableau 9: les principaux ouvrages dans la région 2014/2015 [69].....	30
Tableau 10: Bilan proposé pour les nappes phréatiques du Tadla (superficielles et profondes) [67]	32
Tableau 11: Synthèse des données sur les eaux souterraines [67]	33
Tableau 12: Evolution de la demande en eau potable entre 2010 et 2030 (Mm3) [68]	35
Tableau 13: Perspectives d'évolution de la population dans la zone d'étude [68]	38
Tableau 14: Flux de pollution d'origine urbaine de la zone d'étude [67].....	38
Tableau 15: Flux de pollution d'origine industrielle de la zone d'étude [67].....	39
Tableau 16: Charges polluantes d'origine agricole [79]	40
Tableau 17: Sources industrielles et agricoles des métaux présents dans l'environnement [142]	55
Tableau 18: Effets des principaux métaux lourds rencontrés dans l'environnement sur la santé	57
Tableau 19: Production agricole, Filières végétales dans la plaine (recensement 2014-2015) 61	
Tableau 20: Production agricole, Filières animales dans la plaine (recensement 2014-2015) 62	
Tableau 21: Production agricole, production animales dans la plaine (recensement 2014-2015)	62
Tableau 22: La relation entre l'indice d'aridité de Martonne et le type de climat	84
Tableau 23: Calcul de l'ETP mensuelle et annuelle par la méthode de Thornthwaite (Source : ABHOR 1985-2016)	87
Tableau 24: Bilan de Thornthwaite, entre 1985 et 2015 (Source : ABHOR 1985-2016).....	88
Tableau 25 : synthèse de l'irrigation des lysimètres installés dans les agrumes.....	132

Résumé

La présente étude a été menée dans la plaine de Tadla située au centre du Maroc. Sur la variation spatiotemporelle des caractéristiques physicochimiques, sur les teneurs en métaux lourds des eaux souterraines et des essais lysimétriques dans la station d'Ouled Gnow, différentes analyses ont été faites sur un total de 80 échantillons d'eau souterraine. Les résultats montrent que la température, le pH et l'O₂ dissous sont normales, la conductivité électrique est comprise entre 400 et 6990 µS/cm, NO₃⁻ se situe entre 24,46 et 140,82 mg/l, et NO₂⁻ entre 1,78 et 2,42 mg/l. La majorité des résultats des ions majeurs (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, et Mg²⁺) ne dépassent pas les normes fixées par l'OMS.

Les différentes concentrations des éléments traces métalliques (Al, Fe, Zn, Cu, Mn, Mg, Ni, et P) dans les eaux souterraines de la plaine de Tadla, sont généralement dans la gamme standard admissible, à l'exception des puits P₇, P₁₃, P₃₀, P₃₂, P₃₈, P₄₄, P₅₄P₆₃ et P₆₆ (P₇ et P₁₃ à ouled nemma, P₃₀ route afourar, P₆₆ ouled gnaou, P₃₈ et P₄₄ à ouled zemam), qui présentent des dépassements des normes admissibles pour presque tous les éléments analysés.

L'analyse en composante principale (ACP) a été utilisée pour savoir la distribution des variables et les corrélations entre les paramètres physico-chimiques. L'analyse bactériologique a montré que les eaux souterraines ne sont pas contaminées. La cartographie de la qualité des eaux souterraines à l'aide du système d'information géographique (SIG) pour les différents paramètres analysés durant les périodes d'étude montre quatre classes: bonne, modérée, mauvaise à très mauvaise qualité pour chaque paramètre.

Les intrants agricoles qu'ils soient engrais ou pesticides, sont utilisés d'une manière intense dans l'agriculture et ils sont les principales sources de contamination des eaux souterraines.

Mots clés: Plaine de Tadla, eaux souterraines, agriculture, irrigation, nitrates, lysimètre.

Abstract

Our study was conducted in the Tadla Plain located in central Morocco, on the spatio-temporal variation of the physicochemical characteristics, and on the contents of heavy metals of the groundwater, more of the lysimetric tests in the ouled gnou station. Different analyses were done on a total of 80 groundwater samples to determine the main elements. The results show that the temperature, the pH and dissolved O₂ are normal, the electrical conductivity is between 400 and 6990 $\mu\text{S} / \text{cm}$, NO₃⁻ is between 24.46 and 140.82 mg / l, and NO₂⁻ between 1.78 and 2.42 mg / l. The majority of the major ion results (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, and Mg²⁺) do not exceed the standards set by WHO (2006).

The different concentrations of metallic trace elements (Al, Fe, Zn, Cu, Mn, Mg, Ni, and P) in the groundwater of the Tadla Plain are generally within the allowable standard range, with the exception of the P7 wells, P13, P30, P32, P38, P44, P54 P63 and P66, which exceed acceptable standards for almost all elements analyzed.

Principal component analysis (PCA) was used to determine the distribution of variables and the correlations between physico-chemical parameters. Bacteriological analysis has shown that groundwater is not contaminated and in general. Groundwater quality mapping using the geographic information system (GIS) for the various parameters analyzed during the study periods shows four classes: good, moderate, bad to very poor quality for each parameter.

Agricultural inputs, whether fertilizers or pesticides, which are used extensively in agriculture are the main sources of groundwater contamination.

Keywords: Tadla plain, groundwater, agriculture, irrigation, nitrates, lysimeter.

ملخص

أجريت دراستنا في سهل تادلة الواقع في وسط المغرب، على الاختلاف الزمني المكاني لخصائص الفيزيائية والكيميائية، وعلى محتويات المعادن الثقيلة من المياه الجوفية، أجريت تحليلات مختلفة على ما مجموعه 80 عينة من المياه الجوفية لتحديد العناصر الرئيسية. أظهرت النتائج أن درجة الحرارة، ودرجة الحموضة و O2 المذاب طبيعية، الموصلية الكهربائية بين 400 و 6990 ميكروليتر / سم، NO3- ما بين 24.46 و 140.82 ملغم / لتر، و NO2- بين 1.78 و 2.42 ملغم / لتر. لا تتعدى غالبية النتائج الأيونية الرئيسية (Na + K و Ca + Mg2+) المعايير التي وضعتها منظمة الصحة العالمية (2006).

تركيزات مختلفة من العناصر المعدنية (Al، Fe، Zn، Cu، Mn، Mg، Ni، P) في المياه الجوفية في سهل تادلة هي عادة ضمن النطاق القياسي المسموح به، باستثناء آبار P7 و P13 و P30 و P32 و P38 و P44 و P63 و P54 و P66، والتي تتجاوز المعايير المقبولة لجميع العناصر التي تم تحليلها تقريبًا.

تم استخدام تحليل المكون الرئيسي (PCA) لتحديد توزيع المتغيرات والعلاقات بين المعايير الفيزيائية والكيميائية. أظهر التحليل البكتريولوجي أن المياه الجوفية ليست ملوثة وبصفة عامة. يوضح تخطيط جودة المياه الجوفية باستخدام نظام المعلومات الجغرافية (GIS) لمختلف المعلومات التي تم تحليلها خلال فترات الدراسة أربعة فصول: نوعية جيدة، معتدلة، سيئة إلى رديئة للغاية لكل معلمة.

تعد المدخلات الزراعية، سواء كانت الأسمدة أو المبيدات الحشرية التي تستخدم على نطاق واسع في الزراعة، هي المصادر الرئيسية لتلوث المياه الجوفية.

الكلمات الرئيسية: سهل تادلة، المياه الجوفية، الزراعة، الري، النترات، مقياس الذوبان

INTRODUCTION GENERALE

L'activité agricole occupe une place prépondérante dans l'économie du Maroc, elle s'étend sur une superficie de 9 millions d'hectares, soit près de 12% de l'ensemble du pays. Le secteur agricole représente 48% de la population active, dont l'irrigation reste l'essentiel utilisateur de l'eau avec près de 90% de la demande globale ([1] ; [2]). Les ressources en eau sont gravement exploitées par les agriculteurs, ainsi que les pratiques agricoles ont généralement des conséquences négatives sur la qualité des eaux souterraines ([3]; [4]; [5]; [6]). Le Maroc est un pays connu par son climat aride à semi-aride avec des sécheresses irrégulières, et par conséquent les ressources en eau sont confrontées à des problèmes de quantité et de qualité de l'eau.

La pollution générée par l'utilisation des engrais et des produits phytosanitaires en agriculture est évaluée à 8500 tonnes d'azote et 15 tonnes de pesticides : 8 à 10% de l'azote utilisé comme engrais est lessivé vers les nappes d'eaux souterraines et 0.5 à 1% des produits phytosanitaires rejoignent les cours d'eau ([7];[2]). Ces engrais azotés épandus sur les sols contiennent des nitrates ou des composés qui seront transformés en nitrates par la faune microbienne du sol. Même s'ils sont nécessaires aux productions végétales, mais leur excès est néfaste, ils sont très solubles dans l'eau, et par la suite facilement entraînés vers les eaux souterraines. L'intensification de l'agriculture est généralement accompagnée d'une utilisation excessive et irrationnelle des engrais azotés. Par exemple, les zones irriguées marocaines qui ne représentent que 10 à 12% de la superficie agricole totale reçoivent plus de 50% d'engrais [2]. Il est reconnu qu'une fertilisation minérale s'accompagne d'une augmentation des productivités agricoles mais les grandes doses appliquées, souvent supérieures aux besoins réels des cultures, engendrent des excès d'azote qui peuvent entraver la production agricole par plusieurs mécanismes et polluer l'environnement. En raison des graves conséquences de l'irrigation, il est obligatoire d'adapter les apports d'eau et d'azote aux besoins de la culture au cours du temps, en tenant compte aussi de l'hétérogénéité du sol.

La pollution nitrique est l'un des facteurs importants de dégradation de la qualité des eaux souterraines au Maroc. Ainsi dans les périmètres irrigués, la pollution par les nitrates qui s'infiltrent vers les eaux souterraines est responsable de la détérioration de la qualité des ressources hydriques et engendre un risque sanitaire pour la population rurale s'approvisionnant le plus souvent directement de l'aquifère ([8] ; [2]).

Dans le périmètre irrigué du Tadla, qui représente l'un des 9 grands périmètres irrigués du Maroc, l'intensification de l'agriculture, couplée à une utilisation accrue des ressources en eaux de surface et souterraines, est jugée responsable de la pollution diffuse et de la détérioration de certains paramètres de qualité des eaux souterraines et des sols [8]. Afin d'assurer la conservation et la protection des ressources naturelles dans cette plaine, il est nécessaire de suivre la qualité des eaux et des sols, ainsi que l'évolution quantitative et qualitative des eaux souterraines.

La quantité d'azote lessivée vers la nappe ou ruisselée vers les cours d'eau est évaluée à environ 10% de l'apport en éléments fertilisants; Ainsi environ 3500 tonnes de nitrates, provenant des engrais, parviennent à la nappe du Tadla par lessivage [9]. Egalement, la pollution due aux pesticides a été estimée à 2,2 tonnes de pesticides par an [9].

La surexploitation des eaux souterraines doit nous mener à prendre des précautions sévères et urgentes car le stock en eau disponible est en danger, et il est très difficile de sensibiliser les agriculteurs aux risques d'exploiter le même aquifère par plusieurs usagers à la fois. Cette surexploitation va causer un abaissement des niveaux piézométriques, ce qui va conduire à long terme à un tarissement des puits et des forages.

La plaine du Tadla a une surface irriguée de 124.000 ha dont 101 000 ha sont irriguées par gravitaire, et 23 000 ha sont irriguées par goutte-à-goutte [10], cette plaine est affectée actuellement par la salinité des eaux souterraines suite à la pollution par les nitrates, principalement les Béni Amir (connue surtout par la culture du maïs ensilages, et luzerne, ...) et Béni Moussa (connue surtout par le blé, betterave sucrière, et les agrumes...). La qualité chimique des eaux souterraines du périmètre présente une très grande irrégularité du taux de salure qui varie de moins de 0,5 g/l dans les Béni-Moussa Est, et dépasse 4g/l dans les Béni-Moussa de l'Ouest et les Béni Amir [11].

La pollution des eaux souterraines est un problème d'actualité. Parmi les matières polluantes, on cite les métaux lourds qui sont les plus redoutés du fait qu'ils sont non biodégradables et le phénomène d'autoépuration s'avère souvent incapable de résoudre ce phénomène [2]. Ils peuvent être alors transportés dans le réseau trophique et s'accumuler dans la matière vivante [12]. Les engrais, les pesticides et les eaux usées sont une source importante de métaux lourds dans les ressources en eaux souterraines ([13];[14]). Les éléments traces sont des micropolluants de nature à entraîner des dangers, même quand ils sont rejetés en quantité très faibles. Leur toxicité se développe par bioaccumulation et bioamplification le

long des réseaux trophiques. La toxicité des métaux lourds varie, aussi, selon la concentration et la durée d'exposition [2].

Dans ce contexte, le présent travail est une étude qui présente l'intérêt de déterminer les effets de l'utilisation des engrais sur la qualité des eaux de la nappe du Tadla. Le choix de cette zone, a été justifié par l'importance socioéconomique et écologique que représente cette plaine, ainsi par la forte pression que subit celle-ci en matière d'activités agricoles.

Dans cette étude, nos objectifs sont les suivants :

- ✓ Evaluation du degré de contamination des eaux souterraines de la plaine de Tadla par l'analyse des différents paramètres physico-chimique, bactériologiques et métaux lourds dans les échantillons d'eaux;
- ✓ Impact de la technique d'irrigation sur l'infiltration et le drainage des éléments fertilisants vers les eaux souterraines;
- ✓ Identification des causes possibles de la pollution des eaux au niveau de la plaine;
- ✓ La réalisation des cartes par un Système d'Information Géographique (SIG) pour illustrer la distribution spatio-temporelle de la qualité des eaux souterraines de la plaine de Tadla.

Pour bien développer ces principaux objectifs, cette étude est structurée en trois parties:

- La première partie est une synthèse bibliographique qui rassemble, premièrement les divers types des ressources en eaux dans la région, leurs qualités et leurs utilisations, puis des généralités sur la pollution et les impacts de la pollution des eaux sur la santé humaine et sur l'environnement, et les mesures prises pour la protection des ressources en eaux, ensuite un chapitre qui traite principalement les origines des nitrates et leurs impacts sur la santé et l'environnement, puis un chapitre qui est consacré aux essais lysimétriques, et un dernier chapitre sur la pollution par les métaux lourds.
- La deuxième partie traite deux chapitres, le premier est consacré à la description de la zone d'étude (la plaine de Tadla), alors que le deuxième chapitre correspond aux matériel et méthodes utilisées.
- La troisième partie présente les résultats et discussions.

Vers la fin, une conclusion générale et des perspectives permettront de découvrir l'état des eaux souterraines de la plaine de Tadla, en matière de pollution physicochimique, et métallique produite par les activités agricoles.

PARTIE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

A. GENERALITES SUR LES EAUX

I. Contexte général

L'eau est une ressource naturelle très limitée surtout dans les régions arides et semi-arides. Elle est très demandée et possède une importance dans la gestion de toutes les activités humaines. La terre a des réserves en eau qui sont environ estimées à 1400 millions de milliards de m³ [15], dont, selon l'UNESCO-WWAP, 2,53 % (35 millions de milliards de m³) sont des eaux douces non totalement disponibles [16], parce que les 2/3 sont immobilisées sous forme de neiges et de glaciers en hautes montagnes et aux pôles [17]. Moins d'1 % soit 0,2 million de milliard de m³ des ressources d'eaux douces disponibles, est exploitée, ce qui est équivalent à 8 % des ressources en eau renouvelables prélevées annuellement par les Hommes [18]. La croissance de la consommation de l'eau dans le monde, couplée à la croissance de la population mondiale, en un siècle, la population dans le monde a triplé alors que la consommation mondiale de l'eau a été multipliée par six ([19] ; [20]).

Selon l'UNICEF presque la moitié de la population du monde vit dans les zones urbaines, ce chiffre dépassera 60% en 2025, soit environ 5 milliards de personnes [21]. L'augmentation de la population urbaine est importante surtout dans les pays pauvres, comme exemple entre 1970 et 2000, la population est passée de 635 millions à plus de 2 milliards, soit une croissance de 350% environ en 30 ans par contre dans les pays riches elle n'est que de 54% [22]. D'un pays à un autre, la consommation de l'eau diffère, par exemple, aux Etats Unis, une personne utilise 600 litres d'eau par jour en moyenne, tandis que l'Africain se contente de 10 à 20 litres en moyenne par jour [23]. Cette consommation est très loin des 80 litres d'eau minimum recommandés par l'OMS pour les besoins en ménage, boisson, et hygiène,...etc d'une personne et par jour dans le monde [24].

II. Les activités polluantes des eaux

Actuellement et à l'échelle mondiale, il y a une intensification des activités agricoles et industrielles, on assiste aussi à une augmentation rapide de la population avec une croissance du niveau de vie. Ces activités ont introduit des substances polluantes dans les écosystèmes aquatiques, ces substances ont des effets néfastes sur l'environnement et alors sur la santé humaine [25], on trouve quelques produits chimiques qui peuvent être l'origine de la disparition de certaines espèces végétales et/ou animales, et entraînent alors le dysfonctionnement de la chaîne trophique [26].

Parmi ces polluants, il y a les métaux lourds qui peuvent être nocifs voire même mortels lorsqu'ils dépassent les seuils recommandés, tel que le phosphore et l'azote qui a forte teneur, accentuent le développement algal, alors l'eau étant privée d'oxygène, provoque la mort des poissons et des autres formes de vie marine [25]. Le Maroc aussi n'échappe pas à cette réalité.

La pollution microbiologique est considérée parmi les plus grandes causes de la détérioration de la qualité de l'eau[27], à titre d'exemple, aux États-Unis, pas mal d'événements de contamination bactériologique ont causés des épidémies, à North Battleford, au printemps 2001, une éclosion de Cryptosporidiose toucha presque 2000 personnes[28], à Milwaukee un cas similaire s'est produit en 1993, 403000 personnes sont affectés et ayant pour cause le mauvais fonctionnement de l'usine de traitement[29], en mai 2000, à Walkerton, l'eau brute a été contaminée par une souche dangereuse d'E. Coliprovenant des eaux usées d'une ferme voisine, et près de 5000 personnes sont infectés ([30], [31]).

III. Les problèmes liés aux activités agricoles

En général, la grande consommatrice d'eau est l'agriculture, surtout dans les conditions arides et semi arides, car les exploitants agricoles sont amenés à utiliser différentes sources d'eaux pour l'arrosage de leurs terres agricoles, et l'irrigation de ces dernières contribue à la sécurité alimentaire, à l'amélioration de la qualité de la vie et à la réduction de la pauvreté pour une importante part de la population mondiale, entre outre l'irrigation de ces régions arides et semi-arides, provoque une transformation des conditions de l'évolution du sol, ce dernier qui recevait quelques centaines de millimètre d'eau météorique par an, reçoit instantanément plus de 1000 mm par an par les irrigations, et cette eau présente des teneurs de sels très supérieures à celle des eaux de pluies [32].

Aussi dans le Maroc, l'irrigation est très consommatrice en eau; il est estimé qu'environ 83% des ressources disponibles est utilisée par l'agriculture avec une efficacité inférieure à 50% ([33], [34], [35]).

L'histoire récente est marquée par une formidable augmentation des superficies irriguées qui sont passées de 8 millions d'hectares en 1800 à 48 millions d'hectares en 1900 [36], pour atteindre aujourd'hui plus de 324 millions d'hectares [37]. Pourtant, la croissance prévue de la population du monde pendant les 30 prochaines années demandera une augmentation de la production agricole d'au moins 60 % dans les pays en voie de développement, et 20 % pour les pays développés pour soutenir les niveaux actuels de consommation alimentaire [38].

Cette situation exigera de nouvelles terres irriguées surtout pour les pays du tiers monde dont la plus part sont situés dans des zones arides à semi-arides [39].

Les régions semi-arides et arides sont caractérisées par un bilan hydrique négatif. L'évaporation de l'eau accumulée dans les zones basses, issue des nappes peu profondes ou encore de l'irrigation sur les aménagements hydro-agricoles, naturellement conduit à une concentration des solutions et à une tendance à la salinisation des sols [39]. De nombreux travaux réalisés dans diverses régions du monde font état de ces problèmes : sont particulièrement pour l'Afrique de l'ouest : ceux Vallès et al. (1989) au Mali [40], de Cheverry (1974) [41] et Al Droubi (1976) [42] au Tchad, de Barbiéro et Vallès (1992)[43], Barbiéro et al. (1995) au Niger [44], de Ndiaye (1987) [45] et, de Loyer (1989) au Sénégal [46]. Et au Maghreb (Afrique du nord) : Derbbah et Badraoui (2003)[47] et Ben Abbou et al., (2014) au Maroc[48], Douaoui et Hartani, (2007)[49]; Bouhlassa et al., (2008)[50]; Rouabhia et Djabri, (2010)[51] ; Gouaidia et al., (2012) en Algérie[52].

III. 1. Les facteurs déterminants la qualité des eaux d'irrigation

Les facteurs les plus importants pour déterminer la qualité requise de l'eau dans l'agriculture sont : la salinité exprimée par la conductivité électrique (CE) et le SAR.

a. La conductivité électrique (CE)

Du point de vue agricole, les sols salins sont ceux, qui contiennent des quantités de sels solubles neutres suffisantes pour compromettre dans la zone de racine la croissance de la plupart des plantes [53] (voir le tableau 1). Par définition, les sols salins ont dans les prélèvements de saturation une conductivité électrique de plus de 4 dS.m⁻¹ à 25°C [54].

Tableau 1: Gammes générales pour la tolérance de plante pour salinité de sol [53]

Salinité (EC, dS.m ⁻¹)	Réponse de la plante
De 0 à 2	La plupart du temps négligeable
De 2 à 4	La croissance des plantes sensibles peut être restreinte
De 4 à 8	La croissance de beaucoup de plantes usines est restreinte
De 8 à 16	Seulement les plantes de tolérance se développent de manière satisfaisante
Plus de 16	Seuls quelques plantes très tolérante poussent de manière satisfaisante

Les principaux sels responsables de la salinité de l'eau sont les sels de Magnésium (Mg²⁺), de calcium (Ca²⁺), de potassium (K⁺), de sodium (Na⁺), les sulfates (SO₄²⁻), les chlorures (Cl⁻), et les bicarbonates (HCO₃⁻). Une grande quantité d'ions en solution signifie une valeur élevée de la salinité, ce qui rend plus difficile l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par la plante ([55] ; [39]).

La salinité d'une eau d'irrigation peut se mesurer de deux façons, soit par le total des sels dissous dans l'eau (TDS) exprimées en g/L ou, plus habituellement, par la conductivité électrique (CE) qui est exprimée en déci-siemens/mètre (dS/m)[39]. Le Tableau 2 ci-dessous, donne une classification des eaux d'irrigation proposée par l'United States Department of Agriculture(USDA) [55].

Tableau 2: Classification des eaux d'irrigation proposée par USDA

Nomination	Classe	Interprétations
Classe 1 (C1)	< 0,25 dS/m	Risque faible
Classe 2 (C2)	0,25 dS/m à 0,75 dS/m	Risque moyen
Classe 3 (C3)	0,75 S/m à 2,25 dS/m	Risque élevé
Classe 4 (C4)	2,250 dS/m à 5 dS/m	Risque très élevé
Classe 5 (C5)	>5 dS/m	Non utilisable en irrigation

b. Le Ratio d'Adsorption du Sodium par le sol (SAR)

Le sodium (Na) est parmi les sels dissous dans l'eau, mais il requiert plus d'attention, car de fortes concentrations en sodium peuvent être néfastes pour la plante en modifiant les conditions physiques du sol [56], on ne parle pas de concentration en sodium dans la littérature, mais plutôt d'une valeur qui tient compte des effets mutuels du sodium, du calcium et du magnésium. Il s'agit alors du ratio d'adsorption du sodium par le sol, le SAR (Sodium Adsorption Ratio) qui est calculé selon la formule proposée par Gapon puis rapporté par Richard [57].

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca+Mg}{2}}}$$

Avec : Ca, Mg et Na en mmolc*L-1

Il est au niveau de la défloculation du sol argileux que le sodium agit, ce qui provoque une diminution de la macroporosité (air) et du taux d'infiltration de l'eau. À l'aide du SAR, les

eaux d'irrigation sont divisées en quatre classes, cette classification est basée notamment sur l'effet du sodium sur les paramètres physiques du sol (Tableau 3) [57].

Tableau 3: Classement de la qualité de l'eau en fonction du danger d'alcalinisation du sol (SAR) [58]

Nom de la classe	Classe	Interprétation
Classe S1	$0 < SAR \leq 10$ bas taux de sodium	Eaux utilisables pour l'irrigation de presque tous les sols. Danger d'alcalinisation réduit, bien que certaines cultures sensibles au sodium puissent être gênées.
Classe S2	$10 < SAR \leq 18$ taux moyen de sodium	Le danger d'alcalinisation des sols est appréciable dans les sols à textures fine et à forte capacité d'échange, surtout dans la condition de faible lessivage. Eau utilisable sur les sols de texture grossière, ou sur les sols organiques ayant une bonne perméabilité.
Classe S3	$18 < SAR \leq 26$ haut taux de sodium	Eaux pouvant provoquer l'apparition d'une alcalinité dangereuse dans la plupart des sols, à l'exception des sols pauvres en argile. Emploi exigeant la mise en œuvre d'un aménagement spécial assurant un bon drainage et fort lessivage. L'addition de matière organique, d'amendements chimiques est souvent nécessaire.
Classe S4	$SAR > 26$ très haut taux de sodium	Eaux souvent inutilisables pour l'irrigation, présentant un fort danger d'alcalinisation, ces eaux ne peuvent être utilisées pour l'irrigation, que si l'agriculteur procède au chaulage qui est l'ajout de la chaux (CaO) qui réduit l'excès de sodium en substituant par le Ca.

Suite aux travaux d'Ayers et Westcot, (1988) [59], la FAO a mis des directives pour évaluer la qualité de l'eau d'irrigation. C'est une première étape pour détecter les délimitations dues à une eau d'irrigation. Elles mettent l'accent sur l'influence de la qualité de l'eau d'irrigation sur la production des cultures, et la dégradation des sols à long terme.

Le tableau 4 est un instrument de gestion, comme beaucoup d'outils de ce type en agriculture, selon la FAO, il constitue une première étape à la détermination des limites de qualité d'une ressource en eau en agriculture.

Tableau 4: Les directives pour l'interprétation d'une eau d'irrigation selon la FAO [60]

Nature du problème	Unité	Restriction pour l'irrigation		
		Aucune	Légère à modérée	Forte
Salinité : <i>influe sur l'eau disponible pour la plante.</i>				
CEi	dS/m	<0.7	0.7-3.0	>3.0
TDS	mg/l	<450	450 - 2000	>2000
Infiltration : <i>influe sur la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol : utiliser à la fois CEi et SAR.</i>				
SAR = 0 - 3 et CEi =	dS/m	> 0.7	0.7 - 0.2	< 0.2
SAR = 3 - 6 et CEi =	dS/m	> 1.2	1.3 - 0.3	< 0.3
SAR = 6 - 12 et CEi =	dS/m	> 1.9	1.9 - 0.5	< 0.5
SAR = 12 - 20 et CEi =	dS/m	> 2.9	2.9 - 1.3	< 1.3
SAR = 20 - 40 et CEi =	dS/m	> 5.0	5.0 - 2.9	< 2.9
Toxicité de certains ions : <i>affectent les cultures sensibles.</i>				
Sodium (Na) :				
Irrigation de surface	SAR	< 3	3 - 9	> 9
Irrigation par aspersion	méq/l	<3	> 3	> 9
Chlore (Cl) :				
Irrigation de surface	méq/l	< 4	4 - 10	> 10
Irrigation par aspersion	méq/l	< 3	> 3	
Bore (B)	mg/l	< 0.7	0.7 - 3.0	> 3.0
Eléments traces	Concentration maximale d'éléments à l'état traces recommandés pour les eaux d'irrigation.			
Effets divers : <i>Affecte les cultures sensibles</i>				
Azote (NO₃-N)*	mg/l	<5	5-30	>30
Bicarbonate (HCO₃) pour aspersion sur frondaison	méq/l	<1.5	1.5-8.5	>8.5
pH		Zone normale : 6.5 - 8.4		

IV. Normes de qualité des eaux pour les minéraux

IV. 1. Normes de qualité des eaux potables

a. Normes de qualité des eaux potables selon l'OMS

Les lignes directrices de l'OMS en ce qui concerne la qualité de l'eau potable, mises à jour en 2006 sont la référence en ce qui concerne la sécurité d'eau potable.

Tableau 5: Les directives de l'OMS en ce qui concerne la qualité de l'eau potable [61]

Elément/ substance	Symbole/ formule	Concentration normalement trouvée dans l'eau de surface	Lignes directrices fixées par l'OMS
Aluminium	Al		0,2 mg/l
Ammonium	NH ₄ ⁺	< 0,2 mg/l (peut aller jusqu'à 0,3mg/l dans une eau anaérobie)	Pas de contraintes
Antimoine	Sb	< 4 µg/l	0.02 mg/l
Arsenic	As		0,01 mg/l
Amiante			Pas de valeur guide
Baryum	Ba		0,7 mg/l
Béryllium	Be	< 1 µg/l	Pas de valeur guide
Bore	B	< 1 mg/l	0.5mg/l
Cadmium	Cd	< 1 µg/l	0,003 mg/l
Chlore	Cl		Pas de valeur mais on peut noter un goût à partir de 250 mg/l
Chrome	Cr ⁺³ , Cr ⁺⁶	< 2 µg/l	chrome total : 0,05 mg/l
Couleur			Pas de valeur guide
Cuivre	Cu ²⁺		2 mg/l
Cyanure	CN ⁻		0,07 mg/l
oxygène dissous	O ₂		Pas de valeur guide
Fluorure	F ⁻	< 1,5 mg/l (up to 10)	1,5 mg/l
Dureté	mg/l CaCO ₃		200 ppm
Sulfure d'hydrogène	H ₂ S		0.05 à 1 mg/L
Fer	Fe	0,5 - 50 mg/l	Pas de valeur guide
Plomb	Pb		0,01 mg/l
Manganèse	Mn		0,4 mg/l
Mercure	Hg	< 0,5 µg/l	inorganique : 0,006 mg/l
Molybdène	Mb	< 0,01 mg/l	0,07 mg/l
Nickel	Ni	< 0,02 mg/l	0,07 mg/l
Nitrate et nitrite	NO ₃ , NO ₂		50 et 3 mg/l (exposition à court terme) 0.2 mg/l (exposition à long terme)
Turbidité			Non mentionnée
pH			Pas de valeur guide mais un optimum entre 6.5 et 9.5
Sélénium	Se	<< 0,01 mg/l	0,01 mg/l
Argent	Ag	5 – 50 µg/l	Pas de valeur guide
Sodium	Na	< 20 mg/l	Pas de valeur guide
Sulfate	SO ₄		500 mg/l
Etain inorganique	Sn		Pas de valeur guide : peu toxique
TDS			Pas de valeur guide mais optimum en dessous de 1000 mg/l
Uranium	U		0.015 mg/l
Zinc	Zn		3 mg/l

b. Normes marocaines de qualité des eaux potables

Par arrêté conjoint du Ministre de l'Industrie, du Commerce et de la Mise à Niveau de l'Economie et du Ministre de l'Equipeement et du Transport et du Ministre de la Santé N° 221-06 du 2 Février 2006, qui est publié au B.O.N° 5404 du 16 Mars 2006, la présente norme annule et remplace la norme NM 03.7.001 homologuée en 1991.

Tableau 6: Les normes marocaines de la qualité de l'eau potable [62]

Paramètres	Expression des résultats	VMA (valeur marocaine admissible)
Escherichia coli		0 bactérie/100 mL
Entérocoques intestinaux		0 bactérie/100 mL
Nitrites	NO ₂ : mg/l	0,5
Nitrates	NO ₃ : mg/l	50
Arsenic	As : µg/l	10
Baryum	Ba : mg/l	0,7
Cadmium	Cd : µg/l	3
Cyanures	CN : µg/l	70
Chrome	Cr : µg/l	50
Manganèse	Mn : mg/l	0,5
Cuivre	Cu : mg/l	2
Fluorures	F : mg/l	1,5
Mercure	Hg : µg/l	1
Plomb	Pb : µg /l	10
Sélénium	Se : µg/l	10
Bore	B : mg/l	0,3
Nickel	Ni : µg/l	20

IV. 2. Normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation

a. Normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation selon l'OMS

Une eau conforme à l'irrigation est une eau dont les caractéristiques respectent les valeurs limites imposées par des textes de lois et inscrites dans des tableaux de normes.

L'exemple du tableau 7 ci-après résume les valeurs acceptables pour différents éléments trouvés dans l'eau d'irrigation.

Tableau 7: Qualité de l'eau servant à l'irrigation selon l'OMS ([63] ; [64] ; [65])

Paramètre	Unité	Degré de restriction imposé à l'utilisation			
		Aucun	Faible à modéré	Important	
Salinité, EC _w ^a	dS/m	<0.7	0.7–3.0	>3.0	
TDS	mg/l	<450	450–2000	>2000	
TSS	mg/l	<50	50–100	>100	
SAR ^b	0–3	meq/l	>0.7 EC _w	0.7–0.2 EC _w	<0.2 EC _w
SAR	3–6	meq/l	>1.2 EC _w	1.2–0.3 EC _w	<0.3 EC _w
SAR	6–12	meq/l	>1.9 EC _w	1.9–0.5 EC _w	<0.5 EC _w
SAR	12–20	meq/l	>2.9 EC _w	2.9–1.3 EC _w	<1.3 EC _w
SAR	20–40	meq/l	>5.0 EC _w	5.0–2.9 EC _w	<2.9 EC _w
Sodium (Na ⁺)	Irrigation par aspersion	meq/l	<3	>3	
Sodium (Na ⁺)	Irrigation superficielle	meq/l	<3	3–9	>9
Chlorure (Cl ⁻)	Irrigation par aspersion	meq/l	<3	>3	
Chlorure (Cl ⁻)	Irrigation superficielle	meq/l	<4	4–10	>10
Chlore (Cl ₂)	Total résiduel	mg/l	<1	1–5	>5
Bicarbonate (HCO ₃ ⁻)		mg/l	<90	90–500	>500
Bore (B)		mg/l	<0.7	0.7–3.0	>3.0
Sulfure d'hydrogène (H ₂ S)		mg/l	<0.5	0.5–2.0	>2.0
Fer (Fe)	Irrigation par goutte-à-goutte	mg/l	<0.1	0.1–1.5	>1.5
Manganèse (Mn)	Irrigation par goutte-à-goutte	mg/l	<0.1	0.1–1.5	>1.5
Azote total (AT)		mg/l	<5	5–30	>30
pH			Plage normale : 6,5–8		

TDS : matières solides dissoutes totales ; TSS : matières solides en suspension totales.

^aEC: conductivité électrique moyenne en déciSiemens par mètre à 25°C.

^bSAR : taux d'adsorption moyen du sodium ([meq/l^{1/2}])

b. Normes marocaines de qualité des eaux destinées à l'irrigation

La loi 10-95 sur l'eau couplée au d'autres arrêtés, tel que l'arrêté conjoint n° 1276-01 du 17 octobre 2002 portant fixation des normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation - B.O n° 5062 du 5 décembre 2002 : La promulgation de cet arrêté a pour finalité de définir la qualité des eaux devant être utilisées pour l'irrigation et tout particulièrement les eaux usées épurées permettant d'assurer une protection des citoyens contre les différentes maladies hydriques véhiculées par ces eaux.

Tableau 8: Normes marocaines de la qualité de l'eau servant à l'irrigation [66]

Paramètres	Valeurs limites
Salinité totale (TDS) en mg/l	7680
Conductivité électrique en mS/cm	12
Le SAR 0-3 meq/l	<0,2
Le SAR 3-6 meq/l	<0,3
Le SAR 6-12 meq/l	<0,5
Le SAR 12-20 meq/l	<1,3
Le SAR 20-40 meq/l	<3
Sodium mg/l irrigation superficielle	69
Sodium mg/l irrigation par aspersion	9
Chlorure mg/l irrigation superficielle	350
Chlorure mg/l irrigation par aspersion	15
Bore en mg/l	3
Azote nitrique en mg/l	30
Bicarbonate en mg/l	518
Sulfates en mg/l	250
Cuivre en mg/l	2
Zinc en mg/l	2
Aluminium en mg/l	5
Fer en mg/l	5
Lithium en mg/l	2,5
Manganèse en mg/l	0,2
Nickel en mg/l	2

B. LES EAUX DANS BENI MELLAL-KHENIFRA

I. Evaluation des ressources en eau

Pour l'évaluation des ressources en eau et la maîtrise des mécanismes les régissant, les deux facteurs déterminants sont les contextes climatique et géologique. Une attention particulière a également été accordée à la topographie qui conditionne de manière importante le processus de genèse des écoulements des eaux, leur infiltration et la vitesse de propagation des flux [67].

II. Ressources en eaux dans la région

II.1. Eaux de surfaces

Compte tenu de la diversité du relief, la zone est subdivisée en sous bassins versants drainés par de nombreux cours d'eau. De point de vue hydrologique, la région comporte les séries d'apports intermédiaires, à savoir :

- Les apports intermédiaires des différents sous-bassins de l'Oum Er-Rbia proprement dit entre les barrages Ahmed El Hansali et Al Massira décomposés en :

- Apports Ahmed El Hansali – Kasbat-Tadla (Q7);
- Apports Kasbat-Tadla – Mechraâ Eddahk (Q8);
- Apports Mechraâ Eddahk – Ouled Sidi Driss (Q9.2);
- Apports Ouled Sidi Driss – Al Massira (Q10.2);

- Les apports intermédiaires du Lakhdar entre Hassan 1er et Sidi Driss (Q5);

- Les apports intermédiaires de l'Oued Abid entre Aït Ouarda et Ouaourhint (Q9.1);

- Les apports intermédiaires de la Tessaout et du Lakhdar entre Moulay Youssef et Sidi Driss d'une part et Bissi Bissa d'autre part (Q10.1).

Le tableau 9 récapitule les écoulements naturels moyens interannuels des principaux sous-bassins pour les périodes 1941-1980 et 1981-2008.

II.2. Etat de mobilisation des ressources en eau superficielles

A partir des années vingt du siècle dernier, vu son importance, le bassin de l'Oum Rbia a fait l'objet d'un effort d'aménagement. Ce dernier a été renforcé et poursuivi depuis les années soixante-dix. Actuellement, le bassin dispose de 15 grands barrages d'une capacité de stockage totale de 5 100 Mm³ [68].

La zone dispose de près de 600 km de canaux adducteurs qui assurent des transferts intra et extra-bassins, ces canaux desservent différents usages : l'irrigation, l'alimentation en eau potable et industrielle, etc.

Les principaux transferts existants sont les suivants [68] :

- à l'intérieur du bassin : 330 Mm³ depuis Bin El Ouidane pour l'irrigation de la Tessaout aval ; en pratique, environ 30% des ressources disponibles du barrage Bin El

Ouidanesont transférés vers la Tessaout aval et les 70% restant sont dédiés au périmètre des Béni Moussa,

- à l'extérieur du bassin, il existe des transferts de l'Oum Er-Rbia vers plusieurs zones avoisinantes : AEPI (Alimentation en Eau Potable et Industrielle) (170 Mm3) de Casablanca, Settat, Berchid et Marrakech, et irrigation du Haouz (290 Mm3 comme dotation annuelle).

Tableau 9: les principaux ouvrages dans la région 2014/2015 [69]

Ouvrage	Oued	Capacité (Mm3)	Usage
El Hansali	Oum Er-Rbia	744	Energie + Irrigation
Bin El Ouidane	El Abid	1 243	Energie + Irrigation
Hassan Ier	Lakhdar	244	Energie + Irrigation + Eau Potable
My Youssef	Tassaout	151	Energie + Irrigation
Boubagra	Boubagra	1.70	Energie (200Ha)
Takhzrit	Takhzrit	2.70	Energie (200Ha)
Touilteste	Touilteste	1.05	Energie 95Ha
Chbika	Kaicher	1.5	Energie (200Ha)

II.3. Eaux souterraines

La plaine du Tadla correspond à une grande dépression remplie de dépôts en général mio-plio-quaternaires, et recèle les plus importantes nappes qui sont facilement exploitables. Ces nappes sont très vulnérables aux actions anthropiques notamment la pollution générée par l'activité agricole qui s'est développée depuis plus de 70 ans.

Les ressources en eau souterraines dans la région sont constituées des nappes suivantes :

- Les nappes phréatiques du Tadla découpées dans le plan horizontal en trois sous-unités, en rive droite de l'OER (nappe des Béni Amir), deux en rive gauche (nappe du Dir et sa prolongation vers l'aval par la nappe des Béni Moussa) ; ces trois sous-unités correspondent à un découpage hydrographique d'une part, et aux aménagements hydroagricoles d'autre part. Ces nappes présentent par ailleurs des éléments de convergence ou de continuité qui de ce fait peuvent être considérées comme une seule unité hydrogéologique. [68]

- Les nappes profondes du Tadla, comprennent successivement en dessous de la nappe phréatique les niveaux aquifères de l'Eocène, du Sénonien et du Cénomano-Turonien. La distinction entre ces trois sous-unités s'effectue donc cette fois dans un plan vertical, mais les relations étroites qui les lient conduisent à les considérer comme un seul ensemble. [68]

Chaque aquifère épouse en général l'espace occupé par chaque horizon géologique présent dans le Tadla (*Figure 1*). Du bas vers le haut, les couches se présentent comme suit :

- La nappe du primaire
 - La nappe du cénonanien
 - La nappe du turonien
 - La nappe du sénonien
 - La nappe de l'éocène
 - Les nappes du mio-plio-quadernaire (nappes phréatiques de Béni-Moussa et de Béni-Amir).
- Les « Nappes de montagne » qui regroupent un certain nombre de nappes situées sur la bordure septentrionale de l'Atlas : Dogger d'Azilal et Ait M'hamed, Turonien d'Ait Attab, Dogger et Lias dans la région de Demnate, Lias dans les provinces de Khénifra et Béni Mellal. Elles présentent effectivement un grand intérêt hydrogéologique en tant que château d'eau de l'Oued Oum Er-Rbia et de ses affluents (Oued El Abid, Oued Lakhdar et Oued Tessaout) ; [68]

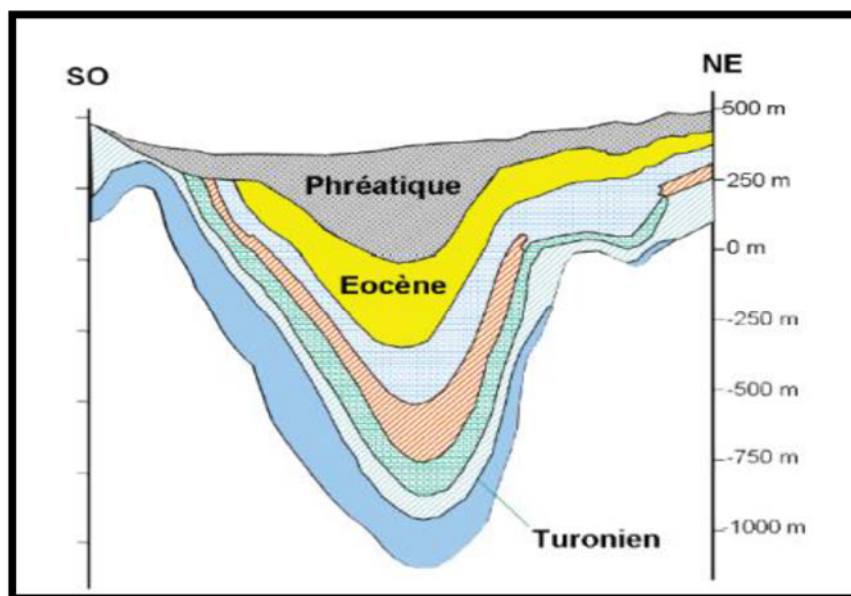


Figure 1: composition du complexe aquifère de Tadla (coupe verticale) [55] (avec SO : Sud Ouest ; NE Nord Est)

a. Les bilans des eaux souterraines

➤ *Nappes du Tadla (superficielles et profonde)*

Dans la région, la nappe Mio-Plio-Quaternaire de Tadla représente un enjeu immense. L'évolution de son niveau a suivi le rythme des aménagements depuis les années 1930. La principale bénéficiaire des apports d'irrigation massif des années 1940 à 1970, la nappe a littéralement « débordée » vers 1970, avant que le réseau de drainage ne devienne réellement efficace. A partir de 1980, la conjonction de la réduction des apports d'irrigation, de la diminution de la pluviométrie et de l'augmentation des pompages a entraîné une baisse des niveaux, surtout importante dans le Dir. L'objectif à rechercher est d'assurer un contrôle inter annuel du niveau en maintenant celui-ci plus ou moins en équilibre, à des profondeurs comprises entre 5 et 40 m sous le sol. [67] Concernant les nappes profondes du Tadla, elles constituent, avec l'aquifère superficiel du Mio-Plio-Quaternaire, un système multicouche unique. Tout changement du bilan d'une des 4 couches, et notamment toute modification sensible du niveau, soit par modification de la recharge artificielle ou naturelle, soit par introduction de pompages générant des rabattements, y génère automatiquement les modifications des échanges verticaux entre ces couches. Aussi, la diminution des apports des dernières années conjuguée à l'augmentation des prélèvements, est à l'origine de la baisse observée des niveaux piézométriques et de la diminution des débits des sources. [67] En tout état de cause, l'utilisation des ressources profondes qui sont de bonne qualité devrait être réservée à la production d'eau potable.

Tableau 10: Bilan proposé pour les nappes phréatiques du Tadla (superficielles et profondes) [67]

Termes du bilan	Nappes phréatiques				Nappe profonde
	Beni Amir	Beni Moussa	Dir	Total	Total
TOTAL ENTREES (Mm3/an)	133	176	118	427	532
TOTAL SORTIES (Mm3/an)	154	203	133	490	570
Entrées- sorties	-21	-27	-15	-63	-38

➤ *Nappes de montagne*

Bien rechargées par une pluviométrie relativement abondante (malgré une diminution remarquable sur les dernières années d'au moins 20%), les nappes de montagne constituent un énorme château d'eau dans leur ensemble. Il doit donc être admis qu'en règle générale tout prélèvement dans ce château d'eau s'effectue au détriment, soit des nappes de plaine dont une

partie de l'alimentation provient de l'infiltration des nappes de piémont, ou d'aboutement avec les nappes de montagne, soit des sources de débordement situées à proximité, soit du débit de base des oueds qui en sont issus, venant ainsi augmenter le déficit de remplissage des barrages. [67]

Le tableau 11 est une synthèse des bilans de l'ensemble des nappes susdites. L'analyse du tableau montre que la quasi-totalité des nappes de la zone, ont des bilans déséquilibrés du fait de leur surexploitation de manière plus ou moins élevée selon les zones.

En conséquence, à ces bilans alarmistes, on peut noter une chute des niveaux d'eau et une diminution de la productivité des ouvrages de mobilisation.

Tableau 11: Synthèse des données sur les eaux souterraines [67]

	Nappe des Beni Amir	Nappe du Dir	Nappe des Beni Moussa	Nappes profondes du Tadla
Apport pluviométrique (mm)	7.00	5.2 5	10.00	413.50
Infiltration des oueds (mm)	0.00	5.11	0.0 0	0.00
Apports profonds et latéraux (mm)	77.50	87.50	87.50	118.00
Retour des eaux (Irrigation+ réseau divers) (mm)	48.75	19.88	78.52	0.25
Total Entrée (mm)	133.25	117.74	176.02	531.75
Sources captées (mm)	0.00	0.00	0.0 0	0.00
Sources non captées et drainage par les oueds (mm)	17.87	1.5 6	11.75	360.25
Pompages (mm)	90.96	71.00	146.08	120.00
Sortie vers autre nappe (mm)	45.00	60.00	45.00	90.00
Débordement (mm)	0.00	0.0 0	0.0 0	0.00
Evaporation (mm)	0.00	0.0 0	0.0 0	0.00
Total sortie (mm)	153.83	132.56	202.83	570.25
Bilan	-20.58	-14.82	-26.81	-38.5

III. Qualité des ressources en eau souterraines

Les ressources en eau souterraines dans la région sont :

- Des nappes profondes, qui sont contenues dans les formations calcaires du Turonien et de l'Eocène du bassin de Tadla. Elles sont exploitées pour la production de l'eau potable et industrielle.

Leur exploitation pour l'irrigation fait l'objet d'un récent développement. [68]

- Des nappes superficielles, comprenant : les nappes des Béni Moussa et des Béni Amir dans la plaine de Tadla, qui sont alimentées par l'infiltration des précipitations et par les percolations des eaux d'irrigation. Elles sont exploitées pour l'irrigation et pour l'alimentation en eau potable d'une partie de la population rurale non desservie par les réseaux d'AEP. [68]

Ces nappes sont exposées à des pressions de pollution diffuses d'origine domestique et agricole, entraînant des conséquences sur leur qualité physico-chimique et bactériologique.

➤ **Qualité des nappes profondes**

En général la qualité globale des nappes profondes est bonne, la salinité des eaux est généralement faible (inférieure à 1 g/l), ainsi que les teneurs en nitrates. Seulement quelques secteurs de la nappe du Turonien du Tadla ont une mauvaise qualité globale, avec des résidus secs dépassant 3 g/let des teneurs en chlorures supérieurs à 6 g/l. [68]

➤ **Qualité des nappes de la plaine du Tadla**

Le résidu sec de ces nappes varie entre moins de 1 g/l à plus de 8 g/l, avec une moyenne d'environ 2,4 g/l [67]. La salinité est généralement plus importante dans la nappe de Béni-Amir où elle dépasse globalement 2 g/l, alors qu'elle est généralement inférieure à 1,8 g/l dans la nappe de Béni-Moussa, à proximité de l'oued Oum Er-Rbia ou de ses affluents le résidu sec est plus faible. [67]

Les teneurs actuelles en nitrates varient généralement entre moins de 10 mg/l et plus de 70 mg/l, avec une concentration moyenne d'environ 27 mg/l. [67]

Les teneurs en nitrates sont légèrement plus faibles dans la nappe des Béni-Moussa ($[NO_3]_{moy} = 26,2$ mg/l) que dans la nappe des Béni -Amir ($[NO_3^-]_{moy} = 27,5$ mg/l). Les secteurs les plus contaminés (teneur en nitrates dépassant 50 mg/l) sont généralement situés à côté des périmètres irrigués du Tadla, conséquence de l'utilisation intense des engrais chimiques.

La pollution bactériologique de la nappe est assez faible, dans la grande partie du bassin, le nombre de Coliformes Fécaux (CF) est en effet généralement inférieur à 2000UFC/100 ml. Le nombre de CF est globalement plus faible dans la nappe des Béni Moussa par rapport à celui de la nappe des Béni Amir. [68]

➤ **Qualité des nappes superficielles**

La qualité des nappes superficielles de la zone est mauvaise à très mauvaise (Béni Amir, Béni Moussa). Cette mauvaise qualité de l'eau est due :

- à la forte salinité, dépassant souvent 5 g/l notamment au niveau de la nappe des Béni Amir;

- aux teneurs importantes en nitrates, dépassant la limite maximale admise dans l'eau potable (50mg/l), notamment dans les nappes du Tadla. Ces fortes teneurs en nitrates sont dues à l'utilisation abusive des engrais chimiques azotés (NPK à savoir azote, phosphore, potassium) au niveau des périmètres irrigués. L'augmentation annuelle moyenne des teneurs en nitrates dans les nappes de Tadla est évaluée à environ 5 mg/l.

La baisse de la recharge naturelle (effet de la sécheresse) et la surexploitation de la plupart des nappes du bassin ont engendré une baisse de niveaux piézométriques.

III.1. Evaluation et projection des besoins en eau

a. Besoins d'alimentation en eau potable

Selon le recensement de 2014, la population de la région est évaluée à 2,52 millions habitants, (7,4% population nationale), dont 54% en milieu rural.

Partant de ce pourcentage et en étudiant l'évolution de l'industrie (notamment les industries agroalimentaires et le pôle phosphater) et du tourisme, les besoins en eau sont évalués comme suit :

Tableau 12: Evolution de la demande en eau potable entre 2010 et 2030 (Mm3) [68]

Demande	Année 2010	Année 2015	Horizon 2020	Horizon 2025	Horizon 2030
Milieu urbain	82	88	94	102	110
Milieu rural	47	63	73	83	91
Industries isolées	68	91	134	155	167
Projets touristiques	2	17	17	17	17
Total zone	199	259	318	357	385
Part Besoins urbains	41%	34%	30%	29%	29%
Part Besoins Rural	24%	24%	23%	23%	24%
Part industries isolées	34%	35%	42%	43%	43%
Part projets touristiques	1%	7%	5%	5%	4%

Selon le plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau (PDAIRE 2012), les besoins propres de la zone, qui s'élèvent aujourd'hui à près de 200 Mm³ par an devraient atteindre 385 Mm³ par an à l'horizon 2030.

b. Besoins en eau d'irrigation

Évaluée à plus de 90% des prélèvements selon les études effectuées et les données récentes, la demande en eau agricole à partir des ressources en eau de la région est considérée comme une importance capitale dans le problème de la gestion de l'eau. Cette demande est représentée par des grands prélèvements d'eau pour l'irrigation, correspondant à des périmètres irrigués de petite, moyenne ou grande superficie auxquels s'additionnent de nombreux prélèvements individuels, diffus surtout dans les Béni Amir et Béni Moussa dont les exploitations ont des superficies entre 3.5 ha et 2 ha respectivement. A l'horizon 2030, les programmes de reconversion de l'irrigation gravitaire en goutte à goutte vise à diminuer cette demande.

b.1. Les prélèvements pour l'irrigation dans les Béni-Moussa

Les volumes pompés pour l'irrigation dans les Béni-Moussa varient autour d'une moyenne annuelle de 167.99 Mm³/an, Les volumes pompés de la nappe pour les besoins agricoles ont connu un accroissement progressif passant de 120 Mm³ en 2002 jusqu'à atteindre 195.02 Mm³ en 2010, Cette augmentation remarquable pourrait être due d'une part à l'augmentation du nombre de puits et d'autre part, à l'augmentation de la superficie dominée par chaque puits au détriment des superficies irriguées par le réseau. [70]

b.2. Les prélèvements pour l'irrigation dans les Béni-Amir

L'évolution des prélèvements au niveau des Béni-Amir oscille autour d'une moyenne de 39.27 Mm³/an, les volumes pompés pour l'irrigation sont marqué par deux périodes, une période allant de 2002 à 2005 connue par un faible pompage, ce qui est expliqué par le fait que cette période est relativement pluvieuse, une autre période allant de 2006 à 2014 marquée par un fort pompage, ce résultat peut être expliqué par la diminution des apports au niveau du réseau. [70]

C. POLLUTION DES EAUX DANS LA PLAINE DE TADLA

I. Généralités sur la pollution

I.1. Définition

Dérivé du latin "polluere", polluer signifie étymologiquement dégrader, salir, infecter souiller. Ces vocales ne prêtent pas à équivoque et nous paraissent tout aussi adéquats que les longues définitions données par les experts. Actuellement, ce verbe a pris le sens de «dégrader un milieu », qu'il soit naturel, urbain ou agricole. C'est donc un dommage causé

par l'homme à son environnement et à lui-même [71]. La pollution entraîne une perturbation de l'écosystème dont les conséquences peuvent aller jusqu'à la migration ou l'extinction de certaines espèces incapables de s'adapter au changement. [72]

Selon la législation marocaine la pollution de l'environnement est définie comme « tout impact ou modification direct ou indirect de l'environnement provoqué par un acte ou une activité humaine ou par un facteur naturel susceptible de porter atteinte à la santé, à la salubrité publique, à la sécurité ou au bien-être des personnes ou de constituer un danger pour le milieu naturel, les biens, les valeurs et les usages licites de l'environnement ». Ainsi elle définit les facteurs et les produits polluants comme « tout produit solide, liquide ou gazeux, bruit, radiations, chaleur ou vibrations sonores résultant des activités humaines et susceptibles, directement ou indirectement, de polluer l'environnement ou de favoriser sa dégradation » [73]. La législation européenne définit la pollution comme « l'introduction directe ou indirecte, par suite de l'activité humaine, de substances ou de chaleur dans l'air, l'eau ou le sol, susceptibles de porter atteinte à la santé humaine ou à la qualité des écosystèmes aquatiques ou des écosystèmes terrestres dépendant directement des écosystèmes aquatiques, qui entraînent des détériorations aux biens matériels, une détérioration ou une entrave à l'agrément de l'environnement ou à d'autres utilisations légitimes de ce dernier » [74].

D'après le dictionnaire de l'environnement, les termes normalisés de l'Association française de normalisation (AFNOR), le polluant est défini comme un altéragène biologique, physique ou chimique, qui au-delà d'un certain seuil, et parfois dans certaines conditions (potentialisation), développe des impacts négatifs sur tout ou une partie d'un écosystème ou de l'Environnement en général ([75] ; [2]).

II. Sources des pollutions par secteur dans la plaine du Tadla

Selon l'origine des substances polluantes, cinq catégories de pollutions sont à distinguer [76].

II.1. Pollutions domestiques

En 2010, la population de la zone est estimée à près de 5,1 millions d'habitants, dont plus de 2 millions en milieu urbain. Les projections de la population à l'horizon 2030 sont basées sur un accroissement de 24 % et un léger accroissement de la part relative de la population rurale. [68]

Tableau 13: Perspectives d'évolution de la population dans la zone d'étude [68]

	2010	2015	2020	2025	2030
Population urbaine	2 053 614	2 217 911	2 380 570	2 557 298	2 749 470
Population rurale	3 132 601	3 272 107	3 401 278	3 536 390	3 677 780
Population totale	5 186 215	5 490 018	5 781 848	6 093 688	6 427 250

La population urbaine se répartit entre quatre grandes villes de taille supérieure à 100 000 habitants, 11 villes moyennes (20 000 à 100 000 habitants) et 53 petits centres qui ne dépassent pas 20 000 habitants. Une faible partie, seulement des pollutions urbaines (15%) fait l'objet de traitements. Le bassin compte actuellement seize stations d'épuration, seules deux des quatre grandes villes (Khouribga et Béni Mellal), et deux des douze villes moyennes (Boujaad –Oued Zem) sont équipées de stations d'épuration. [68]

Les rejets de la ville de Khénifra ont un impact relativement apparent sur la qualité de l'eau de l'Oued Oum Rbia, selon les mesures disponibles. Il est plus significatif en matière d'augmentation de la concentration en coliformes fécaux.

Les rejets de la ville de Kasbat Tadla ont aussi un impact significatif sur la qualité de l'eau de l'Oued Oum Rbia, surtout en été. Cet impact est également apparent en hiver, malgré sa faible amplitude.

Pour la ville de Béni Mellal, selon les mesures disponibles, il n'y a pas d'impact significatif sur qualité de l'eau de l'Oued Oum Rbia en raison de l'effet de dilution et de l'autoépuration qui s'effectue le long du parcours de l'Oued Day entre le lieu des rejets et la confluence avec l'Oued Oum Er-Rbia.

Le tableau 14 reporte l'état actuel des flux polluants d'origine urbaine, et son évolution prévisible à l'horizon 2030.

Tableau 14: Flux de pollution d'origine urbaine de la zone d'étude [67]

Année	Volume d'eau usée (Mm3)	Pollution en tonnes				
		DBO5	DCO	MES	NTK	Pt
2005	58	25 733	52 485	34 731	7 044	1 174
2015	66	32 071	65 348	43 207	8 758	1 460
2030	86	42 777	86 439	57 588	1051	1808

II.2. Pollution d'origine industrielle

Les données disponibles révèlent près de 600 établissements industriels dans la zone, qui se répartissent en : activité de l'industrie sucrière, l'industrie laitière, les abattoirs, les

huileries, les tanneries et l'industrie minière. Le tableau 15 ci-après récapitule la pollution industrielle totale et ses projections futures.

Tableau 15: Flux de pollution d'origine industrielle de la zone d'étude [67]

Année	Charge polluante en tonnes	
	DBO5	DCO
2005	19 523	52 316
2015	39 382	113 984
2030	56 827	168 575

Les flux des polluants industriels sont d'une importance sensiblement équivalente à celle des flux d'origine urbaine pour la zone, et les rejets des unités de broyage des olives constituent une importante source de pollution, les rejets liquides produits peuvent être estimés à près de 90 500 m³/campagne oléicole. Il convient de rappeler qu'un seul m³ de margines équivaut, selon sa composition de base, à 1 000 à 2 000 équivalents habitants, une forte charge saline (8 à 10g/l) à cause de l'ajout de sel lors des processus de trituration en plus d'une forte teneur en composés polyphénoliques et phénoliques.

Le traitement de la pollution engendrée par les huileries dans la région doit constituer l'une des priorités de dépollution industrielle.

II.3. Pollution d'origine agricole

L'agriculture est considérée comme étant le secteur le plus consommateur de l'eau et ce dans l'irrigation et l'élevage. L'irrigation nécessite des volumes immenses. A titre d'exemple un hectare de maïs consomme 20000 m³d'eau pendant sa période végétative, et un hectare de riz 40000 m³ d'eau en moyenne. [77]

L'activité agricole est généralement accompagnée par une utilisation excessive d'intrants tels que les fertilisants (essentiellement les nitrates) et les pesticides, ce qui génère une pollution diffuse, qui reste difficile à maîtriser. Son traitement et son évaluation engendre des problèmes particulièrement pénibles.

La pollution agricole constitue une menace sérieuse pour les nappes phréatiques et spécialement dans la plaine du Tadla qui est très vulnérable à ce type de pollution, en raison de sa texture, de la faible profondeur de la nappe associée au développement intensif de l'agriculture irriguée. La région est connue pour les grandes cultures qui sont : céréales, betterave à sucre et légumineuses, et aussi pour des cultures plus particuliers telles que celles du piment niora, du grenadier et du sésame [78]. Les surfaces cultivées et irriguées (La région compte 960 000 hectares de superficie agricole utile, dont 205 000 ha irrigués et 700 000 ha

de parcours) [78], constituent une source de contamination des eaux par les éléments nutritifs, en particulier l'azote et le phosphore, du fait que la plupart des agriculteurs dépassent les doses recommandées.

Les charges polluantes d'origine agricole, calculées sur la base des proportions retenues sont résumées dans le tableau 16.

Tableau 16: Charges polluantes d'origine agricole [79]

Type	Superficie irriguée (ha)	Quantités d'azote et de phosphates lessivées en tonnes	
		Azote	Phosphate
Grande hydraulique	322 849	11 300	1 614
Irrigation privée	77 296	2 319	232
Petite et Moyenne Hydraulique	64 380	1 931	193
Total	464 525	15 550	2 039

Généralement, les doses moyennes de fertilisation azotée appliquées au niveau de la plaine du Tadla sont toujours supérieures aux doses recommandées [80].

II.4. Pollution par les déchets solides

Les villes et centres de la région disposent de décharges sauvages, vu l'absence de décharge contrôlée, dont la quasi-totalité posent de graves problèmes d'ordre sanitaire et environnemental (contamination des ressources en eaux par les lixiviats, émanation des odeurs, dégradation du paysage etc...).

III. Impacts de la pollution des eaux

La pollution de l'eau est devenue l'une des préoccupations majeures au sein de notre pays mais aussi à travers le monde. Même à faibles doses, les polluants dans l'eau (médicaments, engrais, pesticides, rejets industriels) peuvent altérer la reproduction et le développement de la faune, la flore et l'Homme, ce qui conduit à des impacts sanitaires négatifs et des pertes économiques importantes. Actuellement on assiste à une intensification des activités agricoles et industrielles qui introduits dans le système hydrique des substances polluantes qui ont des effets néfastes sur l'environnement en général et spécifiquement sur la santé humaine. [2]

III.1. Impacts sur la santé

En fonction des polluants, le risque sanitaire est de différentes natures : infectieux (parasites, virus, bactéries, champignons), chimique (minéral, organique), et physique (thermique, radioactif). Les risques encourus sont plus ou moins à longs termes, leurs symptômes dépendent de la durée d'exposition, de la nature et de la dose du polluant. Les maladies développées sont multiples parmi elles : saturnisme lié au plomb, Alzheimer lié à l'aluminium, les cancers liés à l'arsenic, au mercure, au chrome, aux hydrocarbures ...

D'autre part les principaux risques sanitaires à court terme sont généralement d'ordre infectieux. Ils proviennent de la présence de micro-organismes. Les effets sont généralement bénins (troubles digestifs, mycoses) mais peuvent s'avérer plus importants (hépatites, typhoïde, leptospirose, cholera, ...). [81]

III.2. Impact sur l'environnement

L'impact environnemental définit l'ensemble des modifications quantitatives, qualitatives et fonctionnelles de l'environnement (négatives ou positives) engendré par un projet, un procédé, un processus, de sa conception à sa "fin de vie". [82]

Il y'a des produits chimiques qui peuvent être à l'origine de la disparition de certaines espèces végétales et/ou animales et par conséquent, entraînent le dysfonctionnement de la chaîne trophique ([26] ; [2])

La contamination des eaux de surface, des eaux souterraines et celle des sols par les métaux lourds qui peuvent être nocifs voire même mortels, croit de plus en plus avec le temps. La pollution des milieux par ces métaux, qui ne sont pas biodégradables, est essentiellement liée à l'activité humaine. Ces contaminants causent un problème environnemental majeur, et le traitement de ces effluents s'avère de plus en plus capitale ; il est nécessaire de développer des techniques pour décontaminer les sites pollués. [83]

IV. Mesures prises pour la protection des ressources en eau

Pour protéger les ressources en eau, plusieurs programmes sont engagés présentement par des différents acteurs.

IV.1. Cadre législatif

Les bases juridiques de l'eau au Maroc se caractérisent par un cadre très protecteur et un régime d'exploitation rigoureusement encadré, et fait de l'eau un bien du patrimoine commun dont l'Etat assure la protection et la gestion et en facilite l'accès à tous.

Les règles qui régissent le domaine public hydraulique sont de différentes origines. Toutefois, au Maroc, le premier texte se rapportant à l'eau date de 1914.

Il s'agit du dahir du 7 chaabane 1332 (1er juillet 1914) sur le domaine public qui, complété par les dahirs de 1919 et 1925, intègre toutes les eaux, quelle que soit leur forme, au domaine public hydraulique. Depuis cette date, les ressources en eau ne peuvent faire l'objet d'une appropriation particulière, à l'exception des eaux sur lesquelles des droits ont été légalement acquis. D'autres textes ont été élaborés par la suite, afin de faire face aux nouveaux besoins qui se sont fait sentir, [84] la législation marocaine sur la protection des ressources en eaux s'est dotée d'un nombre important de textes de loi, spécialement *la loi 10-95*, qui a été révisée en la loi 36-15.

A cet égard, la loi sur l'eau constitue la base légale de la politique de l'eau du pays et se fixe, en conséquence, les objectifs suivants :

- * une planification cohérente et souple de l'utilisation des ressources en eau, tant à l'échelon du bassin hydraulique qu'à l'échelon national ;
- * une protection et une conservation quantitative et qualitative du domaine public hydraulique dans son ensemble ;
- * une mobilisation optimale et une gestion rationnelle de toutes les ressources en eau, en tenant compte des ordres de priorité fixés par le plan national de l'eau ;
- * une gestion des ressources en eau dans le cadre d'une unité géographique, le bassin hydraulique, qui constitue une innovation importante permettant de concevoir et de mettre en œuvre une gestion décentralisée de l'eau. En effet, le bassin hydraulique constitue l'espace géographique naturel le mieux adapté pour appréhender et résoudre les problèmes de gestion des ressources en eau, ainsi que pour réaliser une solidarité régionale effective entre les usagers concernés par une ressource en eau commune ;
- * une administration adéquate de l'eau permettant d'aider à la conception de l'utilisation et au contrôle des opérations citées ci-dessus, en associant les pouvoirs publics et les usagers à toute prise de décision relative à l'eau.

La loi sur l'eau repose sur un certain nombre de principes de base qui découlent des objectifs cités ci-dessus :

- * la domanialité publique des eaux : d'après ce principe, posé par les dahirs de 1914 et 1919, toutes les eaux font partie du domaine public à l'exception des droits acquis et reconnus. Cependant, la nécessité d'une valorisation maximale des ressources en eau imposée par leur rareté a fait que la loi a apporté une limite à ces droits de telle sorte que les propriétaires de droits sur les eaux seulement ou sur des eaux qu'ils n'utilisent qu'en partie seulement pour leurs fonds ne peuvent les céder qu'aux propriétaires de fonds agricoles,

- * la mise au point d'une planification de l'aménagement et de la répartition des ressources en eau basée sur une large concertation entre les usagers et les pouvoirs publics,
- * la protection de la santé de l'homme par la réglementation de l'exploitation, de la distribution et de la vente des eaux à usage alimentaire,
- * la réglementation des activités susceptibles de polluer les ressources en eau,
- * la répartition rationnelle des ressources en eau en période de sécheresse pour atténuer les effets de la pénurie,
- * une plus grande revalorisation agricole grâce à l'amélioration des conditions d'aménagement et d'utilisation des eaux à usage agricole,
- * la prévision de sanctions et la création d'une police des eaux pour réprimer toute exploitation illicite de l'eau ou tout acte susceptible d'altérer sa qualité.

Concernant les pesticides, un ensemble de textes réglemente cet usage [2] :

- Loi n° 42-95 du 21 janvier 1997 relative au contrôle et à l'organisation du commerce des produits pesticides à usage agricole ;
- Décret n°2-99-105 du 5 mai 1999 relatif à l'homologation des pesticides à usage agricole ;
- Décret n°2-01-1343 du 17 décembre 2001 instituant la commission des pesticides à usage agricole ;
- Arrêté de 1984 relatif à l'interdiction des pesticides chlorés.

D. LES NITRATES : ORIGINE ET IMPACT SUR LA SANTE HUMAINE ET SUR L'ENVIRONNEMENT

I. Contexte général

Les activités agricoles sont assez impliquées dans les apports d'azote qui représente le principal composant de la biosphère (environ 78%) et surtout de ses dérivés, les nitrates et les nitrites [221]. Ces derniers par leurs présence dans l'eau, ils peuvent causer des effets néfastes sur l'homme et son environnement [85], la moderne agriculture symbolise une importante source de pollution de l'espace rural et aussi des milieux intégrés par l'homme.

Les nitrates, se forment selon le processus d'ammonification qui conduit à la production d'ammonium (NH_4^+), puis selon le processus de nitrification où l'ammonium se transforme en nitrate qui comporte deux étapes : la nitrosation qui est la formation de nitrites NO_2^- sous l'action de bactéries nommées Nitrosomonas ; et la nitratisation qui est l'oxydation de nitrites NO_2^- en nitrate (NO_3^-) par des bactéries telle Nitrobacter (Voir figure 2).

Dans des milieux notamment acides, les nitrates se transforment naturellement en nitrites, ces derniers peuvent se combiner aux amines et aux amides pour former ce que l'on appelle des nitrosamines [86].

Les nitrates peuvent être assimilés par d'autres organismes tels les plantes, et les microorganismes qui les utilisent pour leurs développements. Aussi, parce qu'ils sont très solubles dans l'eau, une part est systématiquement exportée vers les écosystèmes aquatiques localisés en aval et vers les nappes en profondeur [87].

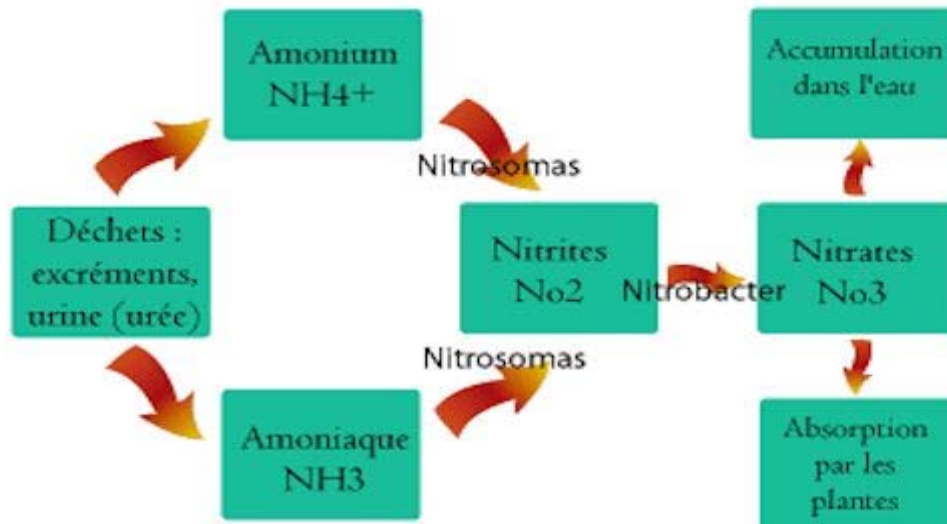


Figure 2: Schéma de processus d'ammonification et nitrification [88]

II. Origine des nitrates

Les nitrates sont naturellement présents dans les sols et dans l'eau, ils sont des sels minéraux de l'acide nitrique, très solubles dans l'eau, ne sont pas retenus par le sol et migrent vers les eaux superficielles et celles souterraines [89]. Les nitrates constituent actuellement l'essentielle cause de pollution des grands réservoirs d'eau souterraine de notre terre. Néanmoins, une forte concentration de nitrates, causée par les activités humaines tels que l'utilisation des engrais, peut être dangereuse pour la santé humaine surtout pour les nourrissons, car ils se dégradent en nitrites qui sont toxiques pour l'organisme. Cette pollution a débuté à la fin des années 1950 et n'a fait qu'augmenter depuis lors, il existe deux origines des nitrates : naturelle et anthropique.

Parmi les origines anthropiques, on cite :

➤ **Origine industrielle et domestique ;**

➤ **Origine agricole :**

Les productions agricoles telles que les céréales, les fourrages, et les légumes sont dépendantes de la quantité d'azote présente dans le sol, pour cette raison les agriculteurs utilisent abondamment les engrais azotés, dont les nitrates, les apports en azote aux cultures s'évaluent jusqu'à 500 kg par hectare et par an[90], les rejets industriels ou urbains restent moindres comparé à cet apport [90].

Par ailleurs, lorsque les besoins annuels des plantes en azote varie d'une plante à l'autre, d'où la nécessité d'un apport raisonné par les agriculteurs, quand les doses optimales en nitrates sont dépassées, ceci entraîne un excédent que la plante n'absorbe plus et qui va être entraîné soit par ruissellement, soit par infiltration dans les nappes phréatiques. Certains légumes (la salade, les carottes, les épinards, les betteraves, et les choux) sont susceptibles d'absorber de fortes quantités de nitrates, lorsque ces derniers sont abondants dans le sol.

On évalue que près de 10 % des composés azotés, qui contaminent les ressources hydriques sont soit artificiels ou apportés par des fumiers et lisiers [91].

Dans les eaux superficielles, la présence de nitrates à des concentrations élevées est habituellement accompagnée de celle de potassium et de phosphore, ce qui rend les eaux très riches en éléments nutritifs, et alors l'eutrophisation des eaux qui favorise le développement d'algues microscopiques qui causent l'asphyxie du milieu et certaines algues produisent des toxines [92].

III. Impacts des nitrates sur la santé et sur l'environnement

III.1. Impact sur la santé humaine

L'effet des nitrates sur la santé humaine a fait l'objet de très nombreuses études, les nitrates et leurs dérivés, ont été incriminés dans la survenue d'une intoxication aiguë chez les nouveau-nés, la méthémoglobinémie du nourrisson qui est constatée en 1945 aux USA et après en Europe (asphyxie qui peut aller jusqu'à la mort), et la possibilité de production de nitrosamines cancérigènes à partir des nitrites dérivés des nitrates à long terme ([93] ; [94] ; [95]).

Les nitrates peuvent être transformés naturellement en nitrites par les microorganismes de notre tube digestif. Ces nitrites qui sont des composés plus réactifs que les nitrates, quand ils dépassent un certain seuil passent dans le sang et se fixent sur l'hémoglobine dont ils inhibent

le fonctionnement et par suite, le transport de l'oxygène dans le sang est bloqué. L'hémoglobine passe de l'état Fe^{++} à l'état Fe^{+++} , incapable de fixer l'oxygène, ce qui conduit à une asphyxie progressive de l'organisme ou cyanose ([96];[97]). Lorsque plus de 5% de l'hémoglobine se transforme en méthémoglobine chez l'enfant, une cyanose peut être observée et si la conversion dépasse 50% la mort est possible [98].

Pour l'adulte, ce risque est très faible, car une enzyme réduit la méthémoglobine en hémoglobine, Et le pH faible dans l'estomac d'un adulte, permet un développement plus aisé des bactéries ayant une activité nitrate réductase, alors que le pH dans l'estomac du nourrisson est plus élevé, car les sécrétions gastriques acides sont plus faibles durant les premiers mois de la vie, alors lorsqu'il y a ingestion d'une forte quantité de nitrate, dans des conditions favorisant sa conversion en nitrites, la méthémoglobine s'accumule ([99]; [93]).

Les nitrosamines peuvent se former à partir des nitrates intégrés, ce qui peut provoquer des risques à long terme sur les possibilités de cancer au niveau de l'appareil digestif surtout chez les personnes qui ont une faible acidité gastrique qui cause la réduction des nitrates en nitrites par la prolifération de la flore gastro-intestinale[100]. Les nitrites se combinent aux amines secondaires prévenant de la nourriture, formant alors des nitrosamines ([101]; [102]).

En revanche, les tests chez de nombreuses espèces animales ont montré l'effet carcinogène d'un grand nombre de nitrosamines qui sont des précurseurs de composés N-nitroso, dont plus de 80 % d'entre eux se sont révélés cancérigènes ([103] ; [104]). Diverses études, permettent de soupçonner fortement la part de teneurs élevées en nitrates dans l'eau et les aliments, et le développement de cancers du pharynx, de la prostate, du colon ou de l'œsophage ([105] ; [106]).

III.2. Impact des nitrates sur l'environnement

L'apport de nutriments azotés, qui sont couramment accompagnés de phosphore dans les eaux souterraines ou superficielles suite aux rejets d'eaux résiduaire domestiques ou de fuites d'effluents animaux par exemple fumier, et lisier qui sont dispersés sur les prairies, permet la prolifération d'une biomasse végétale dans l'eau qui engendrent l'eutrophisation. Lorsque cette biomasse meurt, sa décomposition par la faune aquatique conduit à une consommation d'oxygène et crée des conditions de putréfaction accompagné de production de composés malodorants, généralement de sulfure d'hydrogène (H_2S) [107]. De plus, les nitrates modifient les conditions d'oxydo-réduction du milieu, et entraînent alors la modification du contenu en certains autres éléments en solution. Aussi il se pourrait que l'écologie des milieux souterrains soit affectée tel que les bactéries, et les micro-invertébrés souterrains vivant dans

les nappes. L'excès de nitrates dans les sols peut créer un changement au niveau de la végétation naturelle [2].

IV. Travaux antérieurs sur la pollution nitrique des eaux souterraines au Maroc

Au Maroc les périmètres irrigués sont menacés par la pollution nitrique diffuse des eaux souterraines qui diminue le potentiel des ressources hydriques qui sont de bonne qualité, génère ainsi un risque sanitaire pour la population et pour les développements socioéconomiques du pays. . La maîtrise de cette pollution nécessite des connaissances suffisantes des causes et des mécanismes responsables de ce problème [108].

Au Maroc l'emploi abusif d'intrants agrochimiques couplé à une intensification agricole et d'un pompage important des eaux souterraines, constituent la principale cause de la pollution diffuse des eaux souterraines [109].

Les régions touchées par la pollution nitrique sont le Tadla, le Maâmora de Kénitra, M'nasra du Gharb, les Tariffa, les Doukkala, le Souss-Massa, Berrechid et la nappe de R'mel dans le Loukos [110].

Dans le périmètre du Tadla, l'activité économique la plus dominante dans la plaine est l'agriculture, la pollution agricole est due surtout à l'utilisation intensive des produits phytosanitaires et des engrais qui présentent le principal facteur de l'augmentation des taux de la matière organique et les nitrates dans les eaux souterraines [109]. Les études effectuées dans la région ont montré que les teneurs en nitrates dépassent 50 mg NO₃⁻ /l surtout en aval des Béni Amir et en aval et à l'Est des Béni Moussa Est.

La nappe des Doukkala est qualifiée de qualité mauvaise à moyenne. Cette détérioration est due à la forte minéralisation des eaux et aux teneurs en nitrates qui ont dépassé la valeur maximale admissible pour l'eau potable dans 53%, des puits contrôlés [2].

Pour la nappe de Berrechid, les études ont montré que les teneurs en nitrates dans 70% des puits de contrôle ont dépassé la valeur admissible (50 mg/L), ce qui conduit à un lessivage d'importantes quantités d'engrais azotés vers la nappe phréatique [2].

Au niveau de la nappe des Triffa, plusieurs auteurs ont montré qu'il y a un impact significatif des activités agricoles sur la qualité de l'eau souterraine, spécialement les nitrates, les analyses microbiologiques ont aussi montré que toutes les eaux des puits analysées dépassent des normes des eaux potables en bactéries indicatrices de contamination fécale. ([111] ; [2] ; [112])

Pour la Maâmora de Kénitra, les analyses physico-chimiques des eaux des forages sont adéquates avec les normes de potabilité marocaines sauf un accroissement des teneurs en nitrates (52 - 97 mg/L) dépassent largement la valeur limite de 50 mg/L. ([113] ; [2])

Pour la nappe de M'nasra. Les principaux résultats obtenus ont montré que les moyennes générales de la concentration des nitrates en 1993 et 2003 sont respectivement de 106,4mg/L et 119.6mg/L ([114] ; [2]).

E. LYSIMETRE

I. Contexte général

Les eaux souterraines sont des ressources en eau importantes assez exploitées soit pour l'alimentation en eau potable, soit pour les industries, ou pour l'irrigation des cultures, les prélèvements annuels dans les aquifères représentent des grands volumes surtout pour les pratiques agricoles qui dégradent la qualité des eaux souterraines.

Les eaux qui percolent dans le sol en dessous des zones racinaires entraînent des éléments tel que les nitrates, les pesticides, et les métaux ... etc qui polluent les nappes phréatiques [115]. L'eau s'écoulant dans la porosité du sol avec des vitesses très variables, on distingue alors les écoulements rapides dans les macropores (trous de vers de terre, fissures de retrait, porosité créée par le labour, anciens passages de racine, ...) dits « préférentiels », et des écoulements lents dans les micropores des sols. Ces écoulements, et leur part relative dans le flux de drainage total, sont encore mal connus et font l'objet de nombreuses recherches. ([116] ; [117] ; [118]).

II. Historique

L'histoire du lysimètre s'étend sur une période d'environ 300 ans [119]. Parmi les premières investigations dans le domaine de la lysimétrie, l'une a été entreprise en France en 1688 par De La Hire, mathématicien et météorologue de Louis XIV [120]. Un siècle plus tard, Dalton en Angleterre et Maurice en Suisse mènent de façon indépendante des expérimentations sur les lysimètres en 1796 [119].

Le premier lysimètre à sol non remanié est accordé à Lawes et Gilbert en Angleterre en 1870 [120]. Aux Etats-Unis (USA), des dispositifs automatiques d'enregistrement sont apparus, et permettent de mesurer les principaux composants du cycle hydrologique (précipitation percolation, ruissellement, évapotranspiration) [120]. Les lysimètres sont utilisés en suite pour les études d'évapotranspiration et les bilans de l'eau. Ces dernière

décennies, les lysimètres ont une grande utilité dans la recherche et l'étude quantitative et qualitative des percolats en profondeur ; des bilans, non plus de l'eau, mais aussi d'éléments minéraux ainsi que des transferts de substances et micro-polluants organiques [120].

III. Principe du lysimètre

Les lysimètres doivent satisfaire trois besoins: d'abord permettre des mesures de la lixiviation qui sont fiables, ensuite pouvoir être installés en sites cultivées sans gêne remarquable pour les pratiques agricoles, et permettre une perturbation minimale de sol, parceque la longue durée est l'un des impératifs de la lysimétrie. Le principe de base, est la réalisation d'un bilan. Selon la loi extrêmement générale de conservation de masse, qui est appliquée aux transferts de matières dans le sol, le bilan exprime la variation du stock d'eau du sol pendant un intervalle de temps considéré, en mm de hauteur d'eau, $\Delta Q = Q_{\text{entrée}} - Q_{\text{sortie}}$. Cette relation peut aussi bien s'appliquer aux flux d'eau qu'aux flux de minéraux ou toute autre substance. Si l'on considère le bilan hydrique, le flux d'eau entrant sera $Q_e = P - ETR$ (P est la pluviosité et ETR l'évapotranspiration réelle) et le flux sortant $Q_s = D$ (D est le drainage) [120].

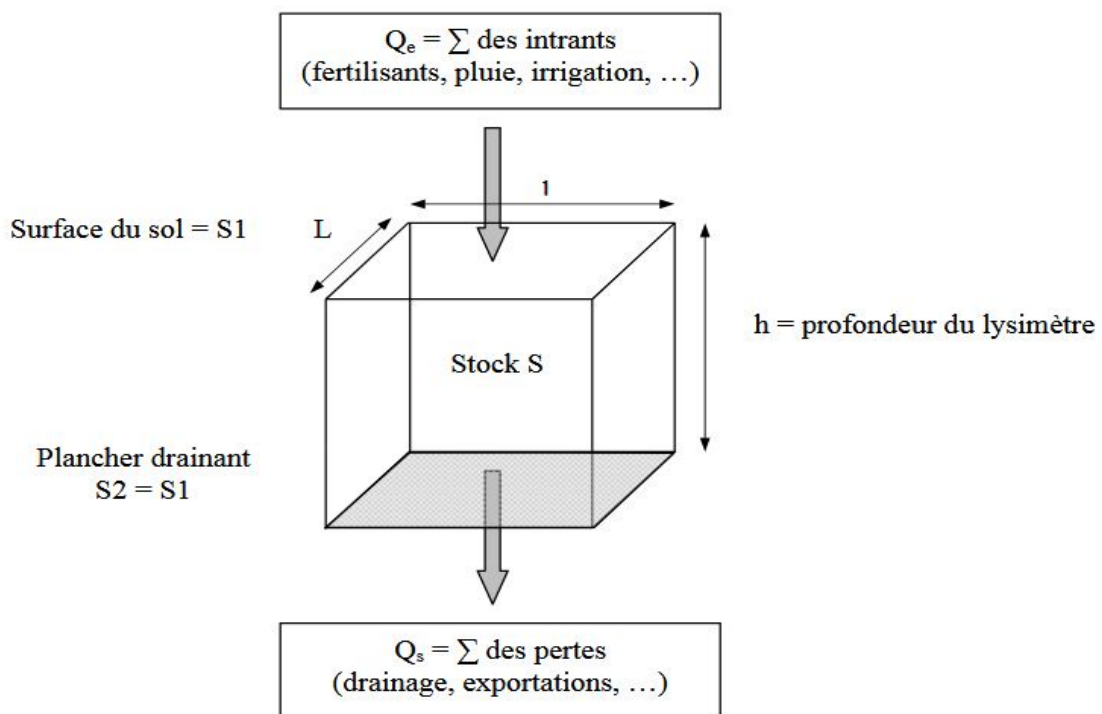


Figure 3: schéma de principe d'un lysimètre [120]

IV. Les types de lysimètres, avantages et inconvénients

Toutes les installations permettant la récolte d'eau en profondeur, présentent des avantages et des inconvénients qu'on doit les connaître pour l'interprétation raisonnable des résultats des mesures [121].

Il existe trois types de lysimètres:

a-Les lysimètres fermés, à sol remanié ou reconstitué, c'est le type le plus couramment utilisé, car c'est le plus facile à réaliser. La cuve lysimétrique de dimension choisie est remplie par des couches successives de sol, ce remplissage est effectué à sec ou dans l'eau par couches successives de 5 à 20 cm d'épaisseur. Afin de reconstituer la densité apparente du sol d'origine chaque couche est tassée [120].

Avantages: Le volume du sol étant parfaitement défini, ces lysimètres sont les seuls dispositifs qui permettent la mesure directe et simultanée des concentrations et des volumes des solutions qui percolent au travers du lysimètre. Le calcul des minéraux et des bilans hydriques, prenant en compte les entrées (pluie, produits phytosanitaires, et engrais) et les sorties (perte par drainage, exportation par les récoltes) et facile à établir. Ces lysimètres fermés, avec sol reconstitué, permettent d'avoir des sols différents sur un même site.

Inconvénients : Les inconvénients majeurs sont l'impossibilité de la réalisation dans des sols caillouteux, le coût et la lourdeur de la mise en œuvre ne permettent que des répétitions et des traitements en nombre limité, ainsi que leur inclusion dans une parcelle sans gêne permanente aux pratiques agricoles, et le problème de la reconstitution du profil initial se pose.

b- Les lysimètres ouverts sont développés à partir de années 1980 en France, ils sont de conception plus récente, et constitués simplement de la plaque de fond, sans parois latérales. Dans le sous-sol, la plaque drainante est enfoncée latéralement à partir d'une fosse préalablement creusée, qui sera utilisée pour la collecte des eaux de drainage. Il en existe plusieurs types [120].

Avantages: Leur construction est moins coûteuse que celle des lysimètres fermés, et ils peuvent être construits en parcelle cultivée sans trop perturber les pratiques agricoles, la mise en place de ces dispositifs conserve mieux la structure du sol et perturbe peu le sol et le sous-sol.

Inconvénients: dans la mesure des quantités lessivées et des volumes drainés une incertitude subsiste, car on ne peut pas être certain du lien exact de la surface de sol concerné et des surfaces de la plaque drainante. Les bilans établis sont souvent sujets à caution.

c- Les bougies poreuses sont des dispositifs formées d'une cupule cylindrique creuse, composée d'un matériau poreux, généralement en céramique, supposé inerte chimiquement, cette cupule est collée à un tube en PVC fermé par un bouchon par lequel passent un ou deux tubes capillaires. L'installation de la bougie doit être faite avec un maximum de soin, le contact sol-bougie est assuré par une pâte constituée à partir des matériaux provenant de l'emplacement d'eau et de la bougie, que l'on injecte dans le trou légèrement surdimensionné juste avant la mise en place du capteur. L'implantation horizontale n'engendre pas de gênes aux pratiques culturales et évite les écoulements préférentiels. Pour extraire la solution de sol, une dépression qui est créée par une pompe à main ou électrique est appliquée à l'intérieur de la bougie poreuse, qui est vidée initialement de son contenu [120].

Avantages : La perturbation au site est minimale et pratiquement n'engendre pas de gêne aux pratiques culturales, ainsi que la mise en œuvre est simple, et répandue pour les recherches sur l'environnement et sur la qualité des eaux.

Inconvénients : La durabilité et la qualité de fonctionnement de ces dispositifs est déterminé par le soin apporté à leurs installation, lors du placement, il faut éviter tout tassement du matériau, car il peut entraîner une baisse de conductivité dans la zone d'installation, il faut aussi assurer un parfait contact entre la paroi du capteur et le sol.

V. Utilisation et objectifs scientifiques

La fonction d'origine du lysimètre comme son nom l'indique, est la mesure de la rétention des solutés et son transport dans le sol. Actuellement, il peut être utilisé également pour déterminer l'évaporation réelle, la recharge des eaux souterraines et le bilan hydrique du milieu. Il a joué un rôle très important ces dernières années, non seulement en termes quantitatifs mais aussi en termes qualitatifs et de prévisions des effets de la pollution sur le sol non saturé et, particulièrement, sur la nappe phréatique [122].

Le bilan hydrique donne une vue d'ensemble des ressources en eau disponibles, et décrit les caractéristiques hydrologiques des bassins versants, ce bilan est influencé non seulement par le climat régional, mais aussi par l'utilisation du sol et la couverture,

ainsi que par différentes interventions anthropiques reliées à la gestion des eaux, comme l'irrigation à grande échelle, la régulation des lacs ou la retenue d'eau dans des réservoirs. L'équation simplifiée du bilan hydrique s'énonce donc comme suit: $P = R + E + \delta S$; Avec précipitations régionales (P), écoulement régional (R), évaporation régionale (E) et variation des réserves (δS) ([123] ; [124])

La formulation la plus générale du bilan hydrique, s'écrit: $P = Q + ETR + DR(u+h)$

Tout ce qui tombe (P) dans un espace hydrologique et dans un intervalle de temps donné soit repart dans l'atmosphère par évapotranspiration (ETR), soit s'écoule (Q), soit participe à la recharge des réserves en eau du sol (R_u) ou du sous-sol (R_h). Les variations de réserve peuvent être aussi négatives et contribuer aux écoulements et/ou à l'évapotranspiration [125].

Les bilans peuvent également intéresser des éléments liés à l'eau, tel que les éléments dissous (on parlera de "bilans géochimiques") ou bien des particules solides véhiculées par l'eau, ou même par d'autres facteurs (bilan érosif) [125].

Le lysimètre permet aussi d'étudier et comparer le comportement de l'eau et de ses solutés lors de son rejet vers l'atmosphère via l'évaporation et la transpiration des plantes ou de la microfaune et microflore du sol (solubilisation de minéraux, infiltration, température selon la profondeur, le type de sol et la nature des végétaux, variation d'acidité et de dureté ou de composition de l'eau, la conductivité (traduisant la teneur en sels), ...). Un lysimètre de précision permet le calcul de l'évapotranspiration sur des périodes de courte durée [126]. Ces paramètres peuvent être essentiels pour savoir par exemple l'impact de la battance des sols, du désherbage, du tassement suite aux pratiques agricoles des sols agricoles ou forestiers suite au foresterie, l'impact de divers polluants et/ou intrants agricoles, du réchauffement climatique, des sécheresses, et la migration des polluants dans un sol pollué, etc [126].

L'azote nitrique est l'élément qui pose plus de problèmes en agriculture. Les nitrates qui sont très mobiles et solubles dans la solution du sol sont facilement lixiviés vers les nappes phréatiques, et constituent alors une source potentielle de pollution nitrique des eaux souterraines ([127] ; [128]). Les cases lysimétriques sont des outils idéals pour déterminer et quantifier l'impact des pratiques agricoles sur la qualité des eaux souterraines et particulièrement sur la lixiviation des nitrates [129].

F. POLLUTION PAR LES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES

I. Généralités sur les éléments traces métalliques

Un métal est un élément chimique souvent issu d'un minerai doté d'un éclat spécifique. C'est un bon conducteur d'électricité et de chaleur, ayant des caractéristiques de malléabilité et de dureté. Leur association avec d'autres éléments forment des alliages [130].

L'appellation de métaux lourds englobe les éléments métalliques naturels caractérisés par une masse volumique élevée, supérieure à 5g par cm³ [131], leur numéro atomique est élevé, en général supérieur à celui du Sodium (Z=11) [132]. Contrairement aux autres contaminants, les métaux lourds sont des minéraux, très toxiques, même à de faibles concentrations [133].

D'après Baize(1997) et Lamprea 2009 ([134];[135]), les éléments traces(ET), sont les 80 éléments chimiques constituant la croûte terrestre, leur concentration ne dépasse pas 0.1% soit 1000mg/kg. L'ensemble de ces éléments représente seulement 0.6%du total, alors que les 12 éléments majeurs, (O ; Si ; Al ; Fe ; Ca ; Na ; K ; Mg ; Ti ; H ; P ; Mn), constituent 99,4 %.

Pour différentes raisons de nombreux scientifiques préfèrent l'appellation «Elément Traces Métallique» (ETM) ou par extension "éléments traces", car certains éléments traces sont des métaux, tels que Cd, Cr, Zn, Pb, Cu, alors que d'autres ne sont pas métalliques. Cette appellation est mieux adaptée que "métaux lourds "car certains métaux toxiques ne sont pas particulièrement "lourds " comme le zinc. De même, certains éléments toxiques ne sont pas des métaux mais des metalloïdes comme l'arsenic [136].

Les métaux occupent une place magistrale dans l'activité économique mondiale. Ils jouent un rôle stratégique dans certaines applications. Il faut préciser qu'il existe 2 catégories d'éléments traces:

-Eléments traces essentiels: indispensables au métabolisme enzymatique et au déroulement des processus biologiques, à de très faibles concentrations, mais sont toxiques seulement à de fortes concentrations, (ex: cuivre (Cu), Zinc (Zn), Fer (Fe), chrome (Cr³⁺)).

-Eléments traces non-essentiels: ces éléments n'ont aucune fonction métabolique connue, ils sont souvent toxique à un seuil inférieur à celui des éléments essentiels, il faut les éviter (ex : plomb (Pb), cadmium (Cd), mercure (Hg) et antimoine (Sb)). ([137] ; [138] ; [139])

Leur caractère persistant signifie qu'ils ne se dégraderont jamais, ni dans l'environnement, ni lors de la transformation de produits alimentaires, ni dans le corps. Ces métaux lourds et leurs composés contaminent de plusieurs manières l'alimentation. [138]

II. Origines des métaux lourds

Les métaux lourds peuvent provenir de plusieurs sources soit d'origines naturelles ou anthropiques.

II.1. Origine naturelle

Les études de la composition chimique des divers composantes de la terre (manteau, noyau, croûte océanique et continentale) ont permis de montrer que ces enveloppes contiennent des ETM distribués avec des concentrations hétérogènes à la surface du globe et dont l'origine est évidemment naturelle ([140] ; [141]). Les ETM naturellement présents dans les sols, sont issus de l'héritage des roches mères altérées et appelées fond pédogéochimique naturel [140]. La désagrégation et l'altération des roches ou érosion mécanique, ainsi que leurs dissolutions par voie chimique (acide carbonique ou humique) peuvent causé un enrichissement de l'eau en éléments métalliques, qui les transportent vers l'aval, et dès que la vitesse du cours d'eau diminue, on assiste à une sédimentation des particules en suspension, et les ETM s'accumulent au fond et dans les bordures des cours d'eau [82]. Les ETM qui sont diffusés vers l'atmosphère proviennent de processus naturels comme l'érosion éolienne, les activités volcaniques, les embruns marins et les feux de forêts [135].

II.2. Origine anthropiques

L'activité anthropique participe à la diffusion des métaux lourds dans les divers écosystèmes tels que ; l'industrie, l'agriculture, le transport, les décharges et les boues urbaines, les exploitations minières, et les activités chimique, Ces activités anthropiques conduisent à une augmentation des concentrations naturelles en éléments traces métalliques [137]. Généralement, les émissions d'origine anthropique des ETM restent de loin les plus abondantes par rapport à celle d'origine naturelle. Lors des activités anthropiques, parmi les différents éléments métalliques émis dans l'environnement, le zinc, le chrome, le plomb, le cadmium, le nickel et le cuivre qui sont les plus couramment mesurés en raison de la diversité des sources d'émission.

Le tableau ci-dessous présente quelques exemples de sources industrielles et agricoles de métaux présents dans l'environnement.

Tableau 17: Sources industrielles et agricoles des métaux présents dans l'environnement [142]

Emplois	Métaux
Batteries et autres appareils électriques	Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Ni,
Pigments et peintures	Ti, Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Sn, Cr, Al, As, Cu, Fe
Alliages et soudures	Cd, As, Pb, Zn, Mn, Sn, Ni, Cu
Biocides (pesticides, herbicides, conservateurs)	As, Hg, Pb, Cu, Sn, Zn, Mn
Agents de catalyse	Ni, Hg, Pb, Cu, Sn
Verre	As, Sn, Mn
Engrais	Cd, Hg, Pb, Al, As, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn
Matières plastiques	Cd, Pb
Produits dentaires et cosmétiques	Sn, Hg
Textiles	Cr, Fe, Al
Raffineries	Ni, V, Pb, Fe, Mn, Zn
Carburants	Ni, Hg, Cu, Fe, Mn, Pb, Cd

III. Phénomène de la bioamplification ou bioaccumulation

Les êtres vivants dans certains écosystèmes, peuvent accumuler dans leur organisme, à divers degrés, toute substance peu ou non biodégradable [2].

Les métaux lourds avec leur caractère non biodégradable peuvent être à l'origine de la disparition de certaines espèces végétales et/ou animales, et entraînent alors le dysfonctionnement de la chaîne trophique [143]. Dans les chaînes alimentaires, les métaux peuvent atteindre des concentrations supérieures de dix fois de celles trouvées dans l'air ou dans l'eau, ce qui conduit à des produits animaux ou végétaux non consommables ([222]; [2]). Le risque de contamination s'amplifie au fur et à mesure que l'on remonte à travers les maillons de la chaîne trophique [138], c'est le phénomène de bioaccumulation, cette bioaccumulation ou bioconcentration est mesurée par le facteur de concentration (FC) qui est une constante issue du rapport de la concentration d'un élément dans un organisme en état d'équilibre à sa concentration dans le biotope([144] ; [2]).

IV. La phytoremédiation

En matière de remédiation des sols, les méthodes physico-chimiques sont habituellement utilisées, malgré leur impact négatif sur la structure et la vie biologique du sol et leur coût élevé.

La phytoremédiation est la dépollution par l'utilisation des végétaux, des sols, des eaux souterraines ou des sédiments ([145] ; [146] ; [147]). Elle a pour but décontaminer un site pollué en substances toxiques responsables de cette pollution qui sont soit des molécules organiques comme les pesticides, soit des métaux lourds ([148] ; [149]). Cette technique peu coûteuse et écologique a été proposée en 1983 par Chaney et présente l'avantage de pouvoir être mise en œuvre in situ [150]. Selon l'EPA (Agence pour la Protection de l'Environnement) la phytoremédiation est définie comme étant « l'utilisation directe de plantes pour la réduction in situ des risques liés aux sols, boues et sédiments contaminés et aussi aux eaux souterraines, par la dégradation, l'extraction ou le confinement des polluants» [151]. Plusieurs techniques basées sur ce principe ont été développées, parmi eux, la phytoextraction, la phytodégradation, la phytostabilisation, et la phytovolatilisation.

V. Les métaux et l'eau d'irrigation

L'irrigation peut, entraînée l'accumulation des métaux dans le sol [152]. Certains sels dissous de minerais sont identifiés comme aliments et sont favorables pour la croissance de plantes, tandis que d'autres peuvent être phytotoxiques ou peuvent à concentration élevée le devenir. Les éléments typiques (Cd, Ni, Hg, Zn, etc..) sont toxiques pour l'agriculture, et des limites maximum de concentration existent pour l'irrigation (voir partie A).

VI. Les métaux lourds et la santé humaine

Depuis l'Antiquité, la toxicité des métaux lourds est connue, certains d'entre eux n'ont pas une fonction biologique essentielle (ex : plomb, cadmium, mercure) tandis que d'autres (ex : fer, cuivre, sélénium, zinc,) présentant une double propriété. Ils sont indispensables à faibles concentrations pour le déroulement des processus biologiques, mais ils peuvent également s'avérer toxiques pour diverses formes de vie dès que leur concentration dans l'organisme dépasse un seuil variable qui va dépend de la nature de l'élément et du tissu de l'organisme considéré [135]. Certains métaux, ont été illustrée tragiquement par plusieurs catastrophes telle que celle de la baie de Minamata, au Japon, dans les années 50 : une usine de produits chimiques déversait le mercure dans la mer, alors que les poissons et les coquillages, largement consommés par la population locale, furent fortement contaminés en mercure avec des teneurs qui sont jusqu'à deux ordres de grandeur au-dessus des normes de l'OMS. Près de 2000 personnes furent contaminées, et la pêche fut interdite pendant 40 ans dans la baie de Minamata ([143];[132];[133]).

Quel que soit le mode de contamination du corps humain soit ingestion, inhalation ou exposition cutanée, les métaux lourds s'accumulent dans l'organisme: sang, cerveau, foie, reins...et ne sont éliminés que très lentement. La demi-vie biologique des métaux s'étale de quelques jours à quelques années selon l'organisme cible.

Les ETM sont responsables de bon nombre de maladies comme la maladie de Minamata déjà citée (en 1956 au Japon) pour le mercure, le saturnisme pour le plomb, la maladie du pied noir (en 1960 à Taïwan) pour l'arsenic. Plusieurs d'entre eux ont des propriétés mutagènes et agissent par exemple sur le placenta (cadmium), l'appareil reproducteur (plomb), l'embryon (mercure) et provoquent des malformations diverses. Le zinc et l'arsenic provoquent également des lésions cutanées très graves [153].

Certains métaux sont indispensables, et dont l'absence empêche le développement ou entrave le fonctionnement d'un organisme, parce qu'ils entrent dans la constitution des protéines et des enzymes qui sont très importantes dans les processus métaboliques des organismes [154]. Le tableau 18 ci-dessus montre les effets de certains métaux lourds sur la santé.

Tableau 18: Effets des principaux métaux lourds rencontrés dans l'environnement sur la santé

Métaux	Effets sur la santé
Aluminium	Neurotoxique, suspecté de jouer un rôle dans la maladie d'Alzheimer.
Arsenic	Lésions cutanées, troubles digestifs, troubles de la reproduction, cancérigène avéré.
Cadmium	Néphrotoxique, cancérigène avéré.
Chrome (VI)	Troubles respiratoires, inflammations des muqueuses, ulcères, cancérigène avéré.
Cuivre	Irritation des muqueuses respiratoires et oculaires, douleurs épigastriques, céphalées, nausées, étourdissements, vomissements, diarrhée, tachycardie, une insuffisance rénale.
Mercure	Neurotoxique puissant, reprotoxique.
Nickel	Atteinte du système respiratoire, cancérigène avéré.
Plomb	Neurotoxique, responsable de saturnisme, troubles du développement cérébral, perturbations psychologiques et difficultés d'apprentissage scolaire chez les enfants, peut-être cancérigène.
Vanadium	Irritation des poumons, de la gorge des yeux et des cavités nasales, troubles digestifs et neurologiques.

VII. Les métaux lourds et l'environnement

Les métaux lourds sont naturellement présents dans l'environnement, surtout dans la croûte terrestre où ils contribuent à l'équilibre de la planète. Mais, par l'intervention humaine, les métaux sont modifiés chimiquement, ce qui peut augmenter leur toxicité. Par le biais d'activités industrielles, minières et agricoles, et aussi de la chasse, l'eau, l'air, le sol, les micro-organismes, les animaux, les plantes, et les êtres humains sont pollués et intoxiqués par ces métaux lourds ([155] ; [156]). Certains lichens ou mousses sont couramment utilisés pour surveiller les métaux dans l'environnement et servent de « bio-indicateurs ».

***PARTIE II : ASPECT
GENERAL DE LA ZONE
D'ETUDE ET MATERIEL &
METHODES***

CHAPITRE I : PRESENTATION DU SITE D'ETUDE

I. Description de la plaine de Tadla

I.1 Cadre géographique

I.1.1. Localisation et production agricole de la zone d'étude

Située au centre du Maroc, la région Béni Mellal Khénifra s'étale sur une superficie totale de 2 811 000 ha [157]. Elle englobe cinq provinces, dont Béni Mellal, avec une population de l'ordre de 2,52 millions habitants (recensement 2014) soit environ 7,4% de la population totale du pays [157]. La Région de Béni Mellal Khénifra est connue pour la diversité de ses reliefs. On y rencontre trois systèmes agro écologiques différents, le dir, la plaine, et la montagne.

La plaine du Tadla se situe dans le bassin de l'Oued Oum Er-Rbia qui traverse et la coupe en deux zones: Béni Amir au Nord et Béni Moussa au Sud dont les superficies irriguées sont respectivement de 33 000 ha et 69 500 ha (fig.6). Ces deux Périmètres sont indépendants sur le plan hydraulique. En effet, l'irrigation des Béni Amir est assurée par les eaux de l'Oum Er-Rbia dérivée par un barrage à Kasba Tadla, tandis que l'irrigation des Béni Moussa se fait par les eaux stockées du barrage Bin El Ouidane construit sur l'Oued El Abid, qui a été mis en service en 1954.

La plaine est limitée au nord par le plateau central et dominé au sud par les sommets du moyen atlas (jbel R'Nim : 2404 m et jbel Tassemit: 2247 m, respectivement au sud et au sud-est de Béni Mellal) [158].

Par ordre d'importance les sols du Tadla appartiennent au groupe des sols isohumiques brun ou châtain subtropicaux, qui sont les plus répons [8]. La plaine consiste en une vaste dépression remplie de dépôts quaternaires, de formations marno-calcaires recouvertes par des limons rouges en surface.

La plaine de Tadla constitue l'une des zones les plus fertiles et les plus productives du Maroc, dont environ 27300 ha dans le périmètre des Béni Amir qui sont irrigués à partir du Barrage Ahmed El Hansali, et 69600 ha dans le périmètre de Béni-Moussa qui sont irrigués à partir du Barrage Bin El Ouidane, plus l'irrigation par les eaux pompées de la nappe phréatique dans les deux périmètres.

Les cultures dans la plaine s'étendent sur une superficie importante, de par son climat, cette région est connue pour la culture d'olives, betteraves, oranges, céréales et piments rouges (voir tableau 19). Quant à la production animale, la prédominance et à l'élevage des

ovins, bovins et les caprins (voir tableau 20), tandis que le tableau 21 représente la production animales.

Tableau 19: Production agricole, Filières végétales dans la plaine (recensement 2014-2015)

Filières	ORMVAT		DPA Béni Mellal	
	Sup (Ha)	Prod (T)	Sup (Ha)	Prod (T)
Agrumes	12436,7	250322	6479,8	98829
Semences sélectionnées	8200	31800		
Céréales en irrigué	42510	237988,5	13205	67000,8
Céréales en bour	118640	198194,2	70250	133175
Fourrages en irrigué	36710	204275,5	3300	17965
Fourrages en bour	9894	37758	8810	38900
Légumineuses en irrigué	1447	2893	1190	1428
Légumineuses en bour	1523	458,5	2160	1125
Olivier	28607	81000	21738	38739,5
Grenadier	1621,65	34972,6	237	2580
Maraîchage	7115	279455,6	2386	68490
Niora	993,6	22952,2		
Caroubier			12500	3125
Sésame	1058	1015	76	73
Amandier	1208	367	244,6	490
Noyer			920	645
Pommier	8,8	310	1639,63	19460
Autres cultures	240	4490	755	81240

Tableau 20: Production agricole, Filières animales dans la plaine (recensement 2014-2015)

Espèces	Province	
	F.B.Salah	B.Mellal
- Bovins	162000	64000
- Ovins	454000	512000
- Caprins	20800	99400
- Equidés	30900	43200

Tableau 21: Production agricole, production animales dans la plaine (recensement 2014-2015)

Filière	Province	
	F.B.Salah	B. Mellal
Lait (Millions litres)	260	45
Viandes rouges (T)	25 000	13 000
Viandes blanches (T)	16 000	9 000
Laine (T)	478	743
Miel (T)	150	80
Œufs (Millions Unités)	4	

Les fertilisants utilisés dans la plaine se répartissent en engrais de fond (N.P.K : 19-38-0 et 14-28-14) et de couverture, principalement les ammonitrates 33.5%, le sulfate de potasse 48%, l'urée 46%, le supertriple phosphate 45% et le sulfate d'ammoniaque 21%. Dans la plaine, la pollution des eaux de la nappe par les nitrates est essentiellement due aux apports de fertilisants azotés supérieures aux besoins de culture.

Dans la plaine du Tadla les principales sources de pollutions sont la pollution industrielle qui est essentiellement générée par des effluents des industries agro-alimentaires notamment les sucreries, les conserveries, les huileries, et la centrale laitière, qui sont implantés dans les régions de Béni Amir et Béni Moussa, puis la pollution domestique par les rejets des eaux usées qui sont déversées directement sans aucun traitement dans l'oued Oum Er-Rbia et aussi dans les puits perdus ou des fosses septiques, et la pollution agricole qui est l'activité économique la plus dominante dans la plaine, cette pollution est due principalement à l'utilisation intensive des produits phytosanitaires et des engrais. Ces pollutions présentent le principal facteur de l'augmentation des taux de la matière organique et les nitrates dans la nappe phréatique.

L'eau utilisée pour l'irrigation dans la plaine du Tadla provient essentiellement des eaux de surfaces, tandis que, la proportion des eaux souterraines devient de plus en plus importante ces dernières décennies à cause de la baisse générale du régime pluviométrique [2].

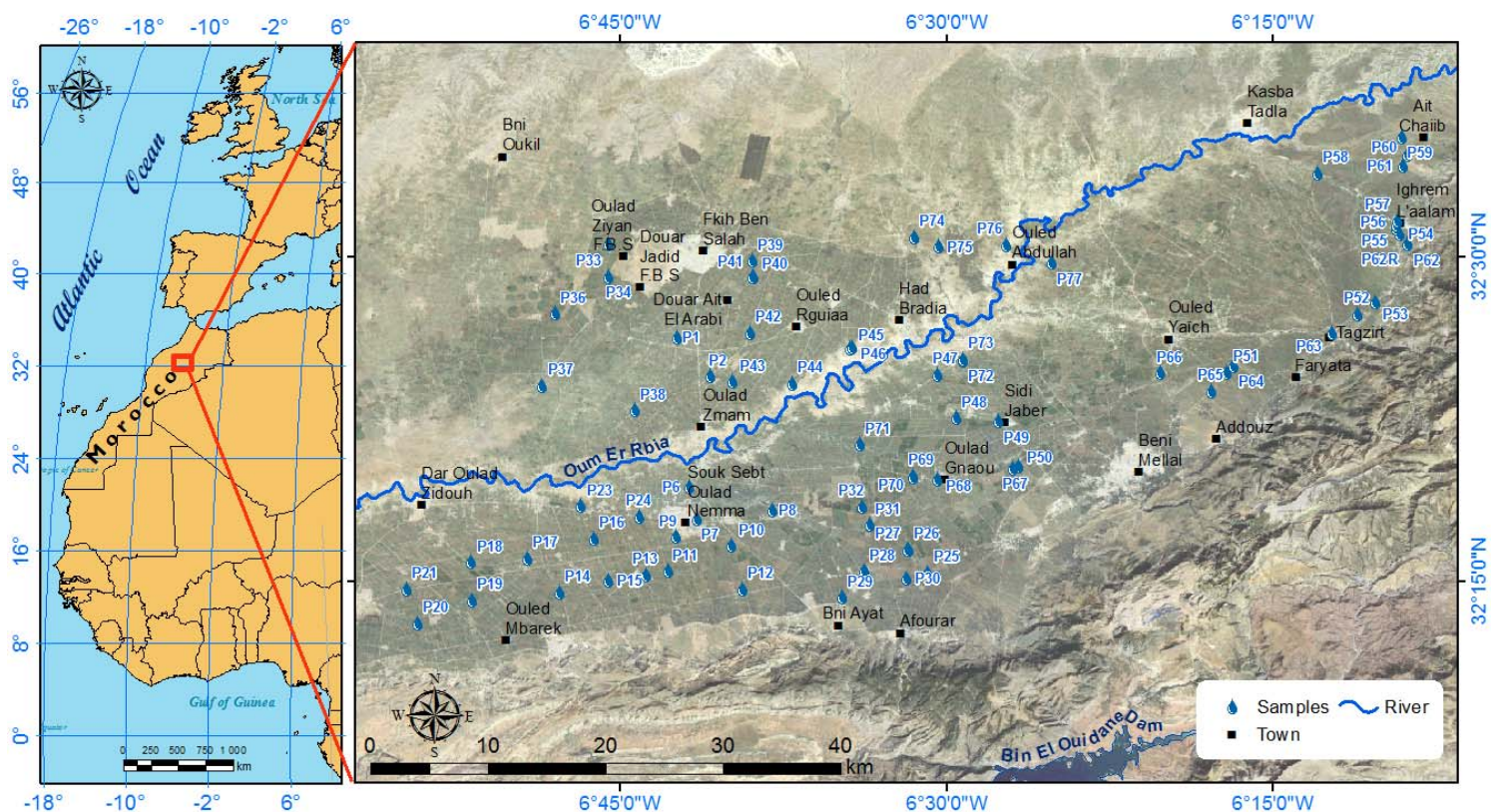


Figure 4: Situation géographique de la zone d'étude et points d'échantillonnage

I.2 Cadre géologique

Le bassin de Tadla proprement dit, se présente de point de vue structural, comme une dépression monoclinale de forme semi-circulaire dissymétrique qui est caractérisée au Nord

par une faible pente (Plateau des phosphates), qui devient importante en s'approchant du piémont Atlasique au Sud. Cet approfondissement relatif à peut-être commencer dès le crétacé. Les épaisseurs du crétacé notamment du turonien, croissant régulièrement du Nord vers le Sud. Le bassin du Tadla se rattache à la Meseta marocaine méridionale et à la zone synclinale de Bahira-Tadla [159]. Plusieurs grandes unités tectoniques délimitent le bassin :

- Le Haut et Moyen Atlas au Sud-Est ;
- Les massifs paléozoïques : Le massif de la Rehamna de l'Ouest, les Jbilets au Sud-Ouest, le massif hercynien de la Meseta marocaine septentrionale au Nord-Est ;
- La Meseta côtière (Bassin de Doukkala) au Nord, séparée du plateau des phosphates par la flexure NE-SW de Settat.

La carte géologique et les forages profonds montrent que, le Bassin du Tadla comporte principalement quatre grands ensembles :

- ✓ Un socle paléozoïque épais, de l'Infra-Cambrien au Carbonifère, on y reconnaît notamment les formations glaciaires de l'Ashgill ;
- ✓ Des formations permo-triasiques à Jurassiques localisées au Nord et au Sud ;
- ✓ Des dépôts transgressifs marins crétacés à éocènes ;
- ✓ Un comblement néogène et quaternaire discordant, principalement continental.

Le socle est marqué par un système de horsts et grabens de direction NE/SW qui détermine la superposition de plusieurs unités emboîtées. Du Nord vers le Sud La couverture s'épaissit d'une manière très importante de 125 m à Khouribga, à 2000 m à Dar Ouled Zidouh. Dans sa partie SW, on assiste au développement d'un prismeliasique et triasique qui se poursuit dans l'Atlas où les formations du Jurassique inférieur et moyen sont très puissantes. La limite sud du bassin du Tadla correspond donc à un trait majeur non seulement structural mais aussi paléogéographique [160].

Les séries secondaires et tertiaires sont les mêmes que celles du Plateau des Phosphates, mais plus épaisses et envahies au niveau du Crétacé Inférieur et Moyen par des sédiments détritiques et lagunaires à évaporites abondantes, en complément il s'y ajoute un Oligo-Miocène marneux et d'épaisses séries plio-quaternaires d'origine continentale et lacustre (fig.5).

La tectonique de compression dont est issu l'Atlas influe dans le même sens sur la géométrie du Bassin qui se replie pour former un sillon. Parallèlement, ce sillon est comblé au Néogène et au Quaternaire par les produits de démantèlement de la chaîne. Ils forment des cônes alluviaux puissants appuyés contre les reliefs [161].

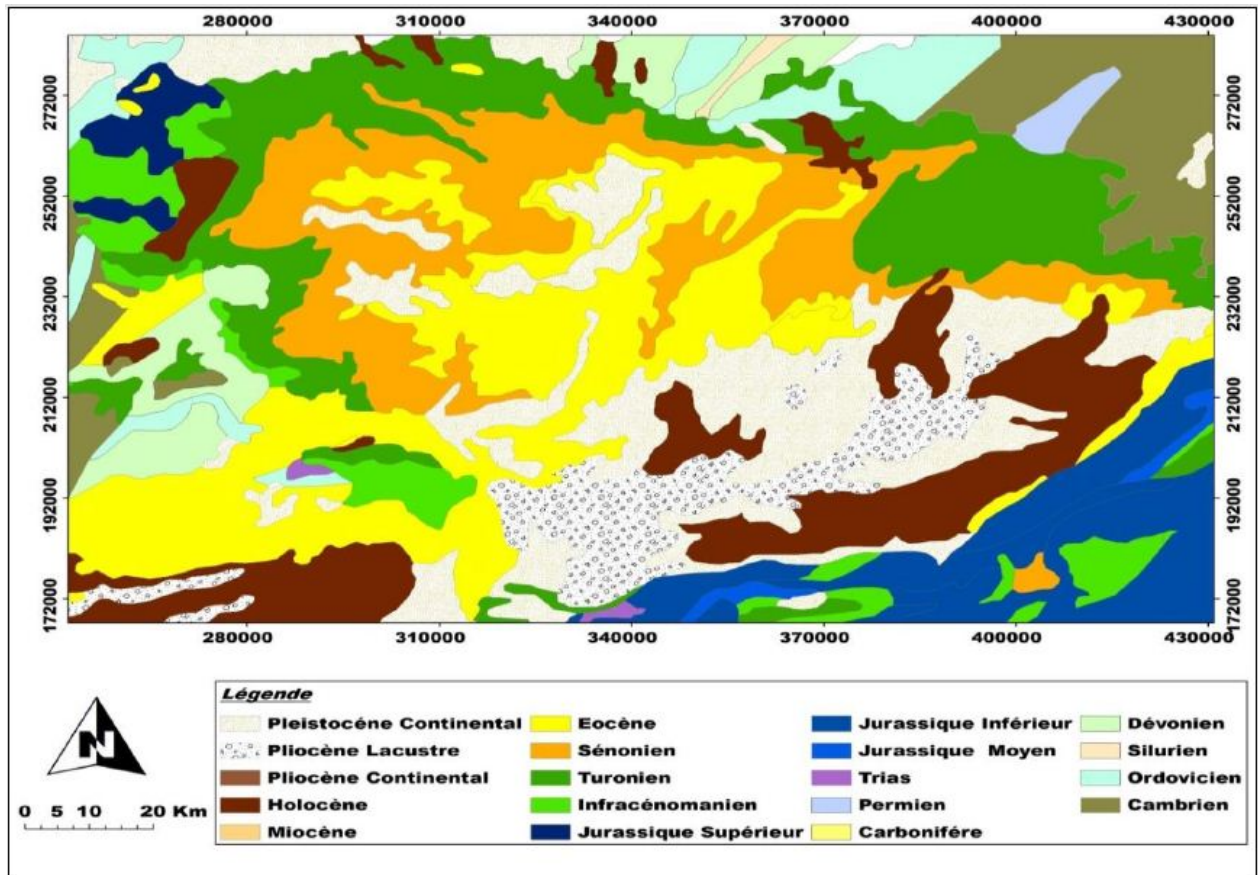


Figure 5: Schéma géologique de la Plaine de Tadla (Extrait de la carte géologique de Rabat à 1/500000)

L'analyse de la carte géologique et le log stratigraphique synthétique montrent que la plaine de Tadla est formée des formations suivant en allant de la base au sommet :

Socle Paléozoïque : représenté par des quartzites et des schistes fortement plissés et faillés. Sur ce socle primaire repose en discordance les formations du Secondaire et du Tertiaire [162].

Trias: Sur des conglomérats de base se déposent des argiles rouges légèrement surmontés par des basaltes doléritiques. Ces formations sont souvent absentes sauf au Sud-Ouest dans la région de Dar Ouled Zidouh dans le forage 2269/36 où il a une épaisseur de 76 m, le forage 3000/36 montre un Trias plus puissant de 200 m, plus au Sud vers l'Atlas. Lithologiquement, le Trias est constitué par deux termes successifs assez différents : une série de grès rouge, débutant par des conglomérats et comportant des niveaux pélitiques, puis un ensemble

d'argiles rouges souvent salifères qui admettent vers leur milieu des coulées des basaltes [162].

Infra-Cénomanién : Correspond à la première transgression, il est caractérisé par un faciès grès rouge, marneux, et gypseux. Sa puissance varie de 10 à 60 m sur le plateau des Phosphates, et est reconnu comme étant le continental intercalaire (argiles rouges), à Dar Ouled Zidouh sur une épaisseur de 200 m [163]. Les dépôts débutent par les conglomérats de base à ciment argileux puis des dolomies, marne dolomitique, argile sableux et anhydrite, ce sont les premières formations évaporitiques [161].

Cénomanién: Constitué par une alternance de marnes et de marno-calcaire blanches et jaunâtres et par des petits bancs très gypseux, sa puissance varie de 20 à 100 m, il repose directement sur le Paléozoïque dans la région de Boujâad et Kasba-Tadla [161].

Turonien : Essentiellement formé de calcaires fortement dolomitiques et peu fossilifères. Il forme un important réservoir d'eau (aquifère profond) [161].

Sénonien : Constitue le mur de la série phosphatée, généralement il est formé par des marnes à caractère régressif, sa puissance varie de 50 à 100 m. Il comprend presque partout deux séries marneuses jaunes, séparées par une barre calcaire d'épaisseur variable [162].

Série phosphatée : Sur le Plateau des Phosphates, on rencontre 5 à 28 m de Maestrichtien (phosphates marneux). Il débute localement par du calcaire très fossilifère à bone-bed. Dès le Maestrichtien, la phosphatogenèse fait brusquement son apparition et se poursuit jusqu'au Lutétien [161].

Mio-Plio-Quaternaire : Dans la plaine du Tadla, ils sont caractérisés en général par une série de faciès : des marnes sableuses à la base, des marno-calcaires et des calcaires sableux terminés par une croûte calcaire [164]. Ces terrains occupent une vaste fosse de subsidence recouverte par des dépôts continentaux du Villafranchien au Quaternaire récent.

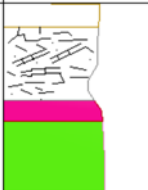
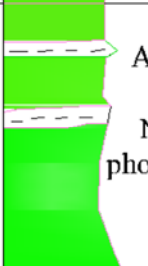

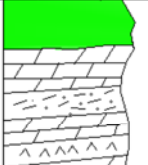
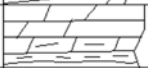
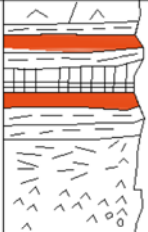
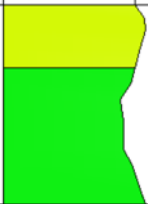

Plaine du Tadla		
FORMATION	LITHOLOGIE	EPAISSEUR
	LOG INSCRIPTION	
Formation Mio-Plio -Quaternaire	 <p>Croute calcaire calcaires sableux Conglomérates polygéniques à ment argileux Marnessableuses</p>	0 à 400 m
Formation Phosphatée (Mastrichtien-Eocène)	 <p>Argiles dolomitiques et dolomites a silex avec débris phosphatée Niveau de calcaire et de dolomies phosphatés imprégnation de matière organique</p>	60 à 300 m
Formation Sénonien marin	 <p>Calcaires lumchelliques</p>	70 à 400 m
2ème Formation évaporitique "Sénorien lagunaire"	 <p>Anyhdrites, dolomies calcaires dolomitiques et marnen</p>	
Cénomaniien - Turonien	 <p>Dolomie et dolomies marneuses</p>	50 à 200 m
1ère Formation évaporitique "infracénomaniien lagunaire"	 <p>Dolomie et mame dolomitiques argiles sableuses , anhydrite Conglomérat de base</p>	20 à 180 m
Trias	 <p>Basaltes doléritiques Argiles rouge et vertes légerement anhydritique conglomérats de base</p>	0 à 500 m
Primaire	 <p>Schistes et quartzites</p>	> 100 m

Figure 6: Log synthétique des formations géologique de la plaine de Tadla [160]

I.3 Cadre Hydrologique

Dans la Plaine du Tadla les ressources en eau sont irrégulières et mal réparties (fig.7). Sur environ 160 kilomètres, l'oued Oum Er-Rbia traverse le Tadla selon une orientation générale ENE-WSW jusqu'à l'amont de sa confluence avec oued El-Abid. Il divise la Plaine en deux secteurs hydrologiquement et hydrogéologiquement indépendants qui sont : les Béni-Moussa en rive gauche et les Béni-Amir en rive droite.

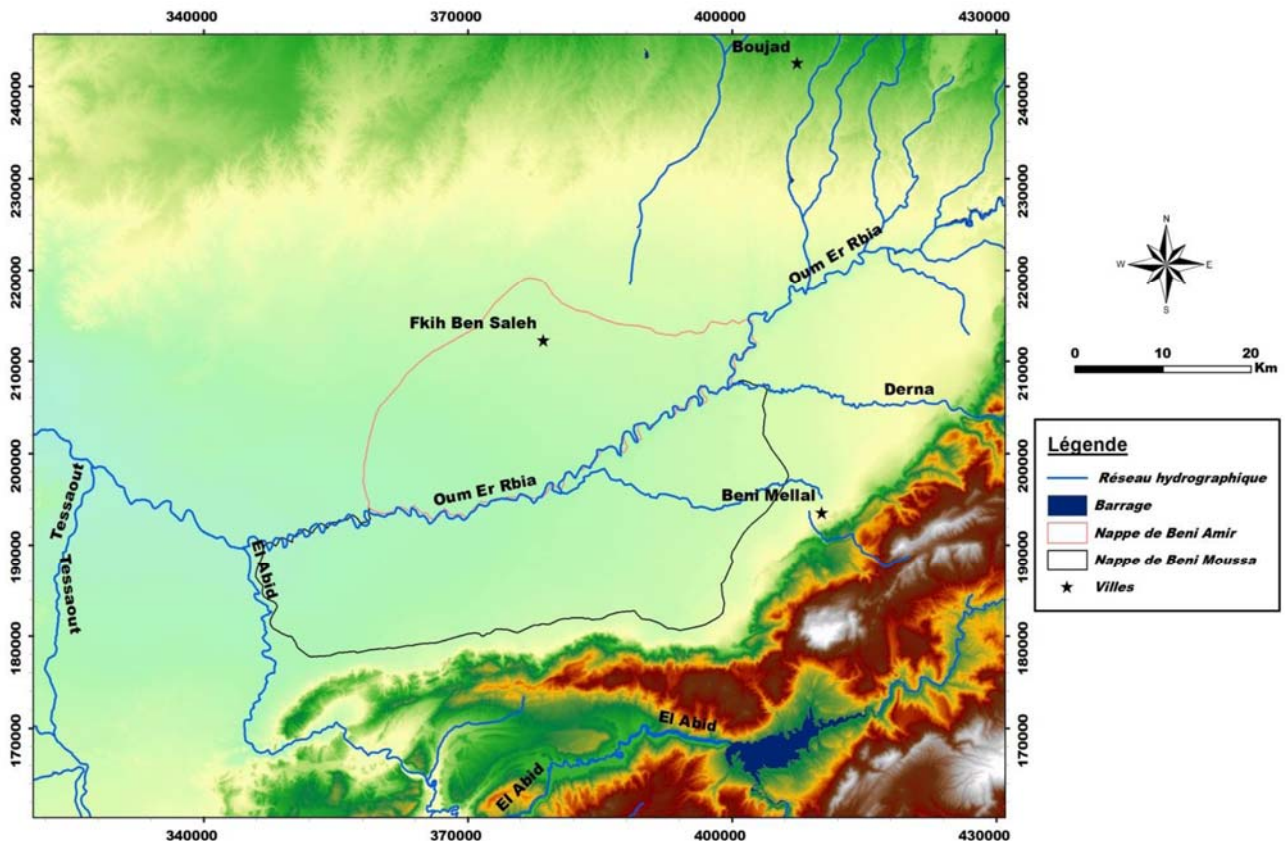


Figure 7: Réseau hydrographique couvrant la Plaine du Tadla

La rive droite est caractérisée par un réseau hydrographique mal organisé dont la plupart des oueds n'atteignent l'Oum Er-Rbia que lors de crues importantes. De l'Est vers l'Ouest on trouve les cours d'eau suivants : Mellah, Bou-Begra, Tahezrit, Bou-Guerroum et Zem. Les eaux de certains de ces oueds pérennes sont utilisées pour l'irrigation locale : Bou-Guerroum et Zem. À l'Ouest de ces oueds sillonnant les Bni-Maâdane, s'étend une vaste région sans drainage naturel limitée arbitrairement à l'Ouest par l'oued Bou-Guerraf-Zoug aux environs d'El-Borouj : une partie de cette étendue est occupée par l'actuel périmètre du Tadla (Béni Amir) [161]. Le drainage des Béni-Amir a été beaucoup amélioré dans la zone irriguée grâce à la construction de nombreux drains-collecteurs.

Par contre, le réseau hydrographique sur la rive gauche de l'oued de l'Oum Er-Rbia, est mieux organisé. De l'Est vers l'Ouest [161], on note :

- Oued Zemkil dont les eaux n'atteignent en général pas l'Oum Er-Rbia;
- Oued Derna orienté E-W et traversant le Tadla sur plus de 25 Km avant de se jeter dans l'Oum Er-Rbia;
- Les collecteurs du périmètre des Béni-Moussa qui ont été aménagés (Oued Day, Derna et Takerzout-El Arich dénommé aussi Rbat sur sa partie supérieure) et enfin Oued El Abid de direction NS parcourant plus de 20 Km en plaine avant d'atteindre l'Oum Er-Rbia.

Trois rivières empreignent leurs marques sur le Tadla : l'Oum Er-Rbia, le Derna et l'El-Abid.

✓ **Oued El-Abid**

Avec un débit moyen annuel de 32 m³/s, oued El Abid est le tributaire le plus important de l'Oum Er-Rbia, il parcourt plus de 20 Km en plaine avant de déboucher dans l'Oum Er-Rbia avec un débit moyen minimum de 10 m³/s et un débit moyen maximum de 77 m³/s et avec une orientation N-S. Les eaux de cet affluent sont régularisées par le barrage de Bin-El Ouidane d'une capacité totale de 1300 Mm³ [165].

✓ **Oued Derna**

L'Oum-Er-Rbia à 41 km à l'aval de Kasba-Tadla reçoit sur sa rive gauche un affluent de type méditerranéen : l'oued Derna. Deux stations hydrologiques sont implantées sur son cours : l'une à l'entrée dans la plaine à Taghzirt, qui fournit depuis 1963 des résultats réguliers, malheureusement peu utilisables, l'autre nommée Moulay-bou-Zekri totalement nouvelle est située à l'aval de l'exutoire du canal principal des Béni-Moussa et a commencé à fonctionner régulièrement également depuis 1963 [161].

✓ **Oued d'Oum Er-Rbia**

A partir d'une quarantaine de sources qui jaillissent au débit moyen de 11 à 15 m³/s au pied de la falaise calcaire de Khedoud située à 26 km au NE de Khénifra, l'Oum Er-Rbia prend naissance. Il est caractérisé par un débit annuel moyen de 35 m³/s, avec un minimum de 8 m³/s et un maximum de 1700 m³/s, il traverse la plaine du Tadla en position presque axiale [166].

Sur le bassin de l'Oum Er-Rbia, les apports pluviométriques sont estimés à 18.2 milliards de m³ soit 12.1% du Maroc, et les ressources en eau potentielles mobilisables à 4322 milliards de m³ pour le bassin de l'Oum Er-Rbia, dont 3996 milliards de m³ pour les eaux de surface et 326 milliards de m³ pour les eaux souterraines, soit 21.9% des volumes mobilisables du Maroc même si la superficie couverte par ce bassin est relativement faible. Les eaux de l'Oum Er-Rbia sont salées, particulièrement en été pendant les étiages [165].

Sur l'oued Oum Er-Rbia et ses affluents, des stations de jaugeage sont installées et font l'objet de mesures régulières et continues, à un pas de temps journalier, par l'ABHOER ; ce qui permet de définir avec une meilleure précision les volumes qui s'écoulent au droit des points jaugés.

I.4 Cadre Hydrogéologique de la plaine de Tadla

L'organisation de diverses formations aquifères identifiées dans la plaine du Tadla montre une géométrie de système multicouche connu par l'existence de quatre aquifères potentiels qui s'étendent sur une large portion environ 10.000 Km² du bassin moyen de l'Oum Er-Rbia [8].

Les nappes de ces quatre aquifères superposées sont libres dans les zones d'affleurement au Nord, elles deviennent captives vers le Sud et sont hydrauliquement interdépendantes et interconnectées. Alors, on doit considérer ces quatre aquifères comme un seul système, tout prélèvement ou recharge soit naturelle ou artificielle sur un des aquifères induit des répercussions sur l'ensemble du système [167].

I.4.1. Les nappes phréatiques du Tadla

L'aquifère du Mio-Plio-Quaternaire est représenté par un complexe fluvio-lacustre très hétérogène, contenant une alternance de calcaires lacustres, de marno-calcaires et conglomérats. Cette entité hydrogéologique bien individualisée est composée de deux nappes situées de part et d'autre de l'Oum Er-Rbia : la nappe de Béni Moussa au sud et la nappe de Béni Amir au nord (fig. 8) [168].

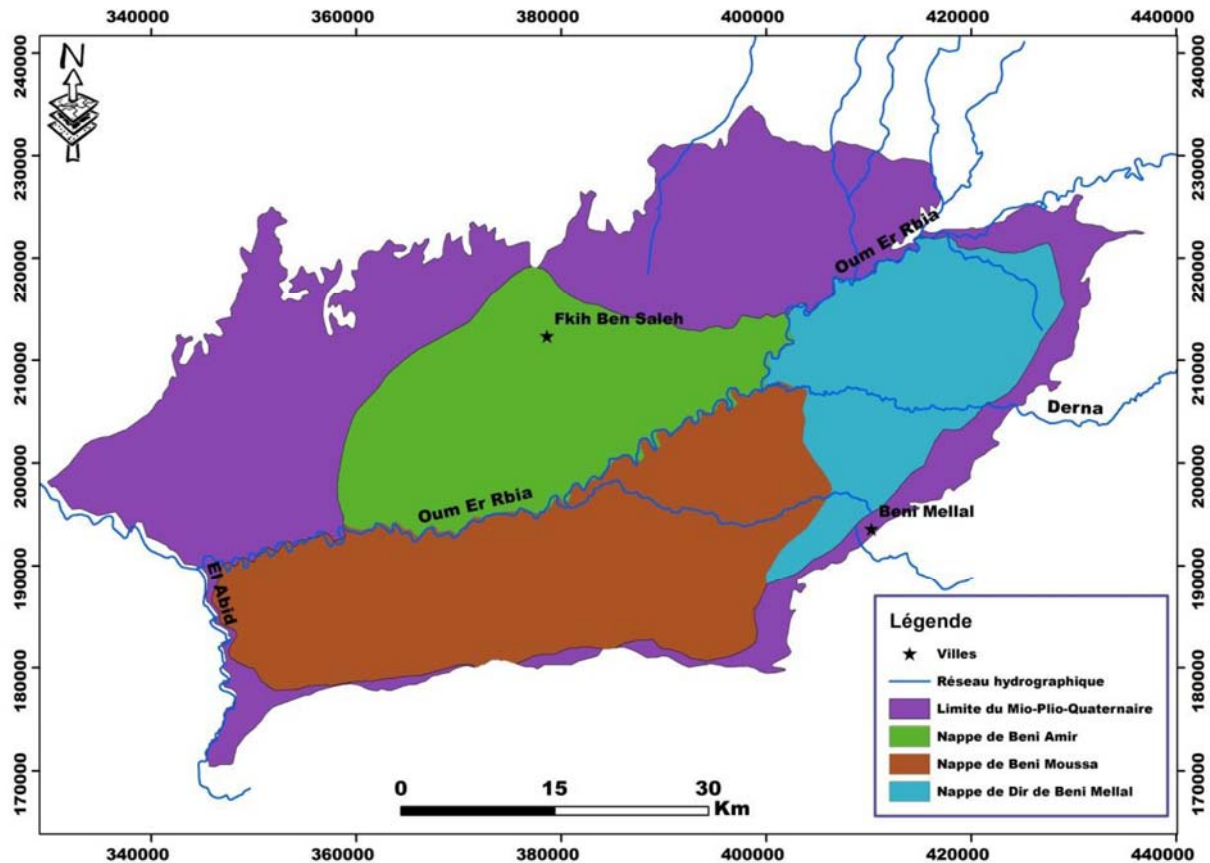


Figure 8: Nappes phréatiques de la Plaine du Tadla (d'après la carte des aquifères de la zone d'action de l'ABHOE)

I.4.1.1 La nappe phréatique du périmètre de Béni Amir

La nappe des Béni Amir est délimitée au Nord par le contact du Quaternaire avec le Lutétien et Sénonien aux environs de Kasba Tadla et au Sud de Boujâd, et par le Lutétien au Nord de Fkih Ben Salah jusqu'à Ouled Sidi Driss sur l'Oum-er-Rbia qui constitue sa limite Sud [169].

Cette nappe circule dans un complexe Plio-Quaternaire composé de marno-calcaires, calcaires francs, et d'argiles et chemine dans le sens NE-SW. À une profondeur d'environ 96 m on trouve un horizon argileux qui paraît continu et peut être considéré comme substratum imperméable [170]. L'écoulement de cette nappe est freiné à l'aval du périmètre irrigué dans la région de Mesgouna où il a été mis en évidence un seuil argileux qui est peut-être à l'origine des remontées observées à l'amont dans des terrains parfois très transmissifs.

L'épaisseur de la nappe est comprise entre 40 et 100 m sur la majeure partie de son étendue et croît du Nord vers le Sud. Elle atteint des valeurs très importantes comprises entre 200 m et 250 m au sud-ouest du périmètre [169].

Le gradient hydraulique moyen est de $2.5 \cdot 10^{-3}$ à $3.5 \cdot 10^{-3}$, voire $2 \cdot 10^{-3}$ aux environs de Fquih Ben Salah, et la pente moyenne de l'écoulement est comprise entre 2.5 et $3.5 \cdot 10^{-3}$. En bordure de l'Oum Er-Rbia les isopièzes s'incurvent de façon à devenir parallèle à la rivière notant ainsi le rôle drainant de celle-ci [171]. Le gradient dans cette zone augmente fortement en raison des faibles transmissivités pour atteindre $6 \cdot 10^{-3}$ voire $1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ [169]. Concernant la perméabilité, elle varie en générale entre 10^{-5} et 10^{-3} m/s avec des valeurs extrêmes qui atteignent $8 \cdot 10^{-6}$ et $2.7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ [169].

Les ressources en eau mobilisables de la nappe des béni Amir sont de $190 \text{ Mm}^3/\text{an}$, en 100 points les transmissivités mesurées varient entre 10^{-3} et $1,5 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$. La plus grande partie du périmètre irrigué renferme des transmissivités se situant entre $5 \cdot 10^{-3}$ et $5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. Les valeurs les plus faibles ont été mesurées au Nord et au Nord-Est de Fkih Ben Salah ; elles sont généralement comprises entre 10^{-4} et $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. La valeur du coefficient d'emmagasinement varie de $1,4 \cdot 10^{-2}$ à $1 \cdot 10^{-1}$ [161].

1.4.1.2 Nappe de Béni Moussa

S'étend sur une superficie d'environ 885 km^2 . La nappe phréatique des Béni Moussa est située entre le pied de l'Atlas au Sud et l'Oum Er-Rbia au Nord. Sa limite Ouest est l'Oued El Abid tandis qu'à l'Es, elle se termine par la ligne unissant Kasba Tadla à Ghorm el Alam. Cette nappe circule dans un complexe plio-quaternaire comprenant principalement des marno-calcaires des calcaires et des argiles [170]. Cependant comme les calcaires sont éparpillés dans la masse marneuse sous forme de lentilles, la circulation de la nappe se fait de façon irrégulière en fonction de la perméabilité.

En fait, il s'agit d'un ensemble argilo-calcaire montrant d'innombrables changements de faciès verticales et latérales dont le détail est encore loin d'être connu. Cet état donne à cette nappe les caractéristiques d'un système multicouche dont les niveaux aquifères seraient séparés par des horizons plus ou moins imperméables qui communiqueraient entre eux soit par drainage soit par variation de faciès.

À propos de l'écoulement de cette nappe, il est de direction générale E-W. L'oued Oum Er-Rbia a un rôle dans le drainage de cette nappe qui semble être canalisée sur un axe d'horizons perméables situé entre la montagne et l'Oued et passant par la Merdja d'El Arich [161].

La plus part des transmissivités s'étend de 1.10^{-3} m²/s à 5.10^{-2} m²/s, avec toute fois dans des zones particulières on trouve de fortes valeurs. D'Est en Ouest, il y a une succession de zones de haute transmissivités séparées par des régions à faible transmissivités. On note une plus forte transmissivités de 16.10^{-1} m²/s au centre du périmètre des Béni-Moussa.

Les valeurs du coefficient d'emmagasinement contrairement aux valeurs des transmissivités, sont très peu nombreuses. À l'échelle de la nappe, ces valeurs restent peu représentatives et insuffisantes. La grande partie des nombres est comprise entre 1 et 5.10^{-2} avec près de 50 % se trouvent entre 1,5 et $3,5.10^{-2}$. Les valeurs du coefficient d'emmagasinement généralement oscillent entre 3.10^{-2} et 6.10^{-2}

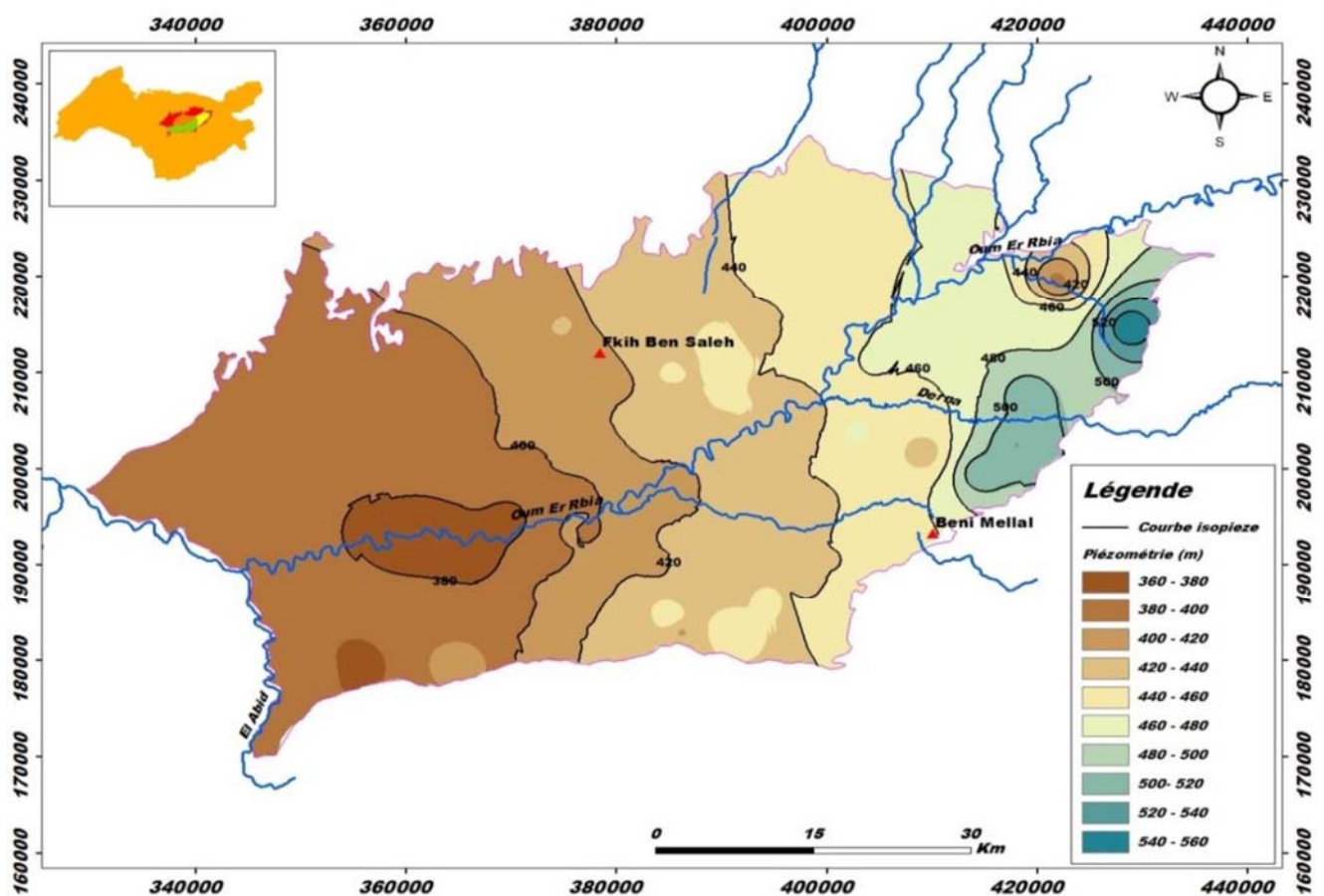


Figure 9: Carte piézométrique de la nappe phréatique du Mio-Plio-Quaternaire de Tadla [161]

L'alimentation des nappes phréatiques de Béni Moussa et de Béni Amir se fait par deux types de recharge :

- La recharge naturelle
- La recharge artificielle

***La recharge naturelle** : La plus part d'études ont comporté des calculs de pluie efficace, les résultats menaient à retenir une lame d'eau infiltrée moyenne de 3 mm dans les Beni Moussa et de 5 à 7 mm dans les Beni Amir avec de fortes variations d'une année sur l'autre (0 à 22 mm dans les Beni Moussa, 0 à 25 mm dans les Beni Amir)[172].

***La recharge artificielle**: Cette recharge qui a débuté avec la mise en place des grands aménagements, est due à l'infiltration des eaux d'irrigation, localisée aux zones irriguées, elle a suivi évidemment l'évolution des apports d'eaux superficielles dont on a exposé aux fortes variations.

I.4.2. Les nappes profondes du Tadla

Les nappes profondes semblent être libres dans la partie Nord et deviennent captives vers le Sud. La nappe captive de Tadla regroupe l'aquifère les carbonates du Sénonien, les calcaires-sableux de l'Eocène, et les carbonates du Turonien [173].

I.4.2.1 Nappe de l'Eocène

Avec une extension de 6500 km² dont environ 2300 km² sont en affleurement et environ 4200 km² sont sous couverture Mio-Plio-Quaternaire, après le Turonien, l'aquifère de l'Eocène est la deuxième ressource en eau souterraine du bassin. Du secteur El Borouj-Fkih Ben Salah jusqu'au secteur de Khouribga, la nappe est rencontrée en affleurement en grande partie sur le Plateau des Phosphates, également elle affleure de l'Oum Er-Rbia jusqu'au Nord de Fkih ben Salah, en passant par Kasba-Tadla où la nappe devient captive, l'Eocène affleure aussi dans le secteur de la Tessaout aval, entre Bou Ghazi et Mzizoua [172].

Sous le plateau des phosphates, l'aquifère de l'Eocène est formé d'alternances de calcaires phosphatés à silex fissurés et de phosphates sableux. Sous la plaine du Tadla au Sud, la série Maastrichtien-Eocène se présente sous forme de sables phosphatés alternant avec des niveaux aquifères de dolomies phosphatées, de calcaires et de dolomies à silex. Elle se termine par un niveau d'argile dolomitique [173].

a) Les paramètres hydrodynamiques

Pour cette nappe, les paramètres hydrodynamiques ne sont pas bien connus sauf quelques forages très séparés pour être représentatifs de l'aquifère. Par exemple à Kasba-Tadla la perméabilité horizontale est de 2.10^{-5} m²/s. Alors qu'à l'Ouest de la zone Fkih Ben Salah- Dar

Ouled Zidouh, la distribution spatiale de la transmissivité est mal précisée et varie de $1.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, à $9.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, avec une valeur moyenne de $5.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ [174].

Les valeurs de transmissivité rencontrées en dehors de cette zone, sont rares : $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ dans le forage 1914/37 au Sud de Kasba- Tadla ; $4.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ dans les forages 2628/37 et 2644/37 au Nord de Béni Mellal ; et $7.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ au forage 1574/36 au Nord de Kelaa des Sraghna. Pour le coefficient d'emmagasinement la seule valeur disponible est 7.10^{-4} [172].

b) Piézométrie de la nappe

La piézométrie de la nappe est représentée dans la carte ci-dessous (fig 10), elle montre que l'écoulement général de la nappe se fait principalement du Nord vers le Sud.

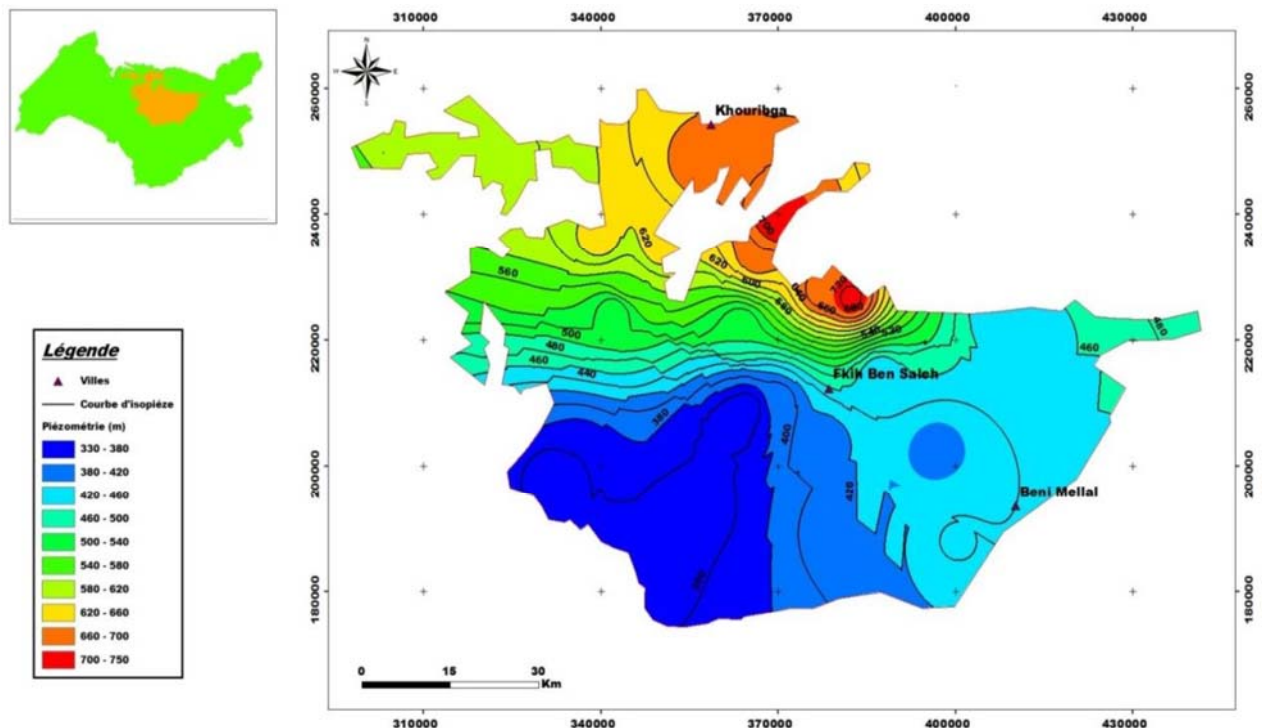


Figure 10 : Carte piézométrique de la nappe profonde de l'Eocène de Tadla

c) Structure générale de l'écoulement

En général l'écoulement de la partie libre de la nappe Eocène se fait du Nord vers le Sud. La pente de la surface piézométrique dans cette nappe est de 0.6% à 0.8%, et elle diminue pour être de 0.4 % dans la partie captive et devient de plus en plus faible 0.1 % vers le Sud. Selon un axe de drainage orienté est-nord-est/ouest- sud- ouest, l'écoulement de la partie captive de l'Eocène se fait vers l'Ouest dans le secteur compris entre Fkih Ben Salah et Dar

Ouled Zidouh, et il se dirige dans le secteur compris entre les Oueds Tassaout et El Abid vers le NE et converge sur l'Oum Er-Rbia [174].

d) La qualité chimique

Concernant la qualité chimique de l'eau de cette nappe, elle est variable et moins bonne que celle du Turonien [168]. Le faciès est bicarbonaté chloruré -et parfois sulfaté- calcoc-magnésien avec un résidu sec compris entre 500 à 1500 mg/l à 110 °C. Dans la partie occidentale, des teneurs en fluor variant de 1 à 3 mg/l ont été notées. Parfois l'eau est plus salée et atteint 9050 mg/l [161].

e) Recharge de la nappe

Pour la recharge de la nappe profonde de l'Eocène, elle s'effectue de plusieurs façons [161]:

- * Compte tenu du caractère karstifié des affleurements, toute la pluie efficace est susceptible de s'infiltrer ;
- * en amont de Kasba Tadla, la recharge est effectuée par les crues de l'Oum Er-Rbia où les calcaires éocènes affleurent dans le lit de l'oued sur une dizaine de km est jugée probable mais non quantifiée ;
- * L'alimentation par drainance ascendante, au travers du Sénonien semi-perméable à partir de la nappe du Turonien.

I.4.2.2 L'aquifère du Sénonien

Dans notre zone d'étude, le Sénonien est le deuxième aquifère, avec une superficie de 9100 Km², les formations sénoniennes affleurent surtout aux environs du Plateau des Phosphates, depuis Kasba-Tadla à l'Est jusqu'à El Brouj à l'Ouest. Le Sénonien est un aquifère constitué de niveaux de calcaires intercalés dans une série calcaréo-marneuse peu épaisse au Nord-Ouest et au Nord, la partie utile de la série augmente vers l'est, où elle peut atteindre 30m et elle peut atteindre 60 m exceptionnellement dans le secteur de Boujad. En dessous de cette série calcaréo-marneuse on trouve une autre série évaporitiques (Sénonien lagunaire) dont l'épaisseur augmente vers le Sud pour atteindre 200 à 300 m au pied de l'Atlas.

a) Les paramètres hydrodynamiques

Dans l'endroit où les mesures sont faites, les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe sont médiocres : des valeurs de transmissivités entre 2.10^{-4} et 2.10^{-5} m²/s, la perméabilité est de l'ordre de 3.10^{-5} et 3.10^{-7} m/s et les mesures de débits exhaures sont toujours inférieures à 2 ou 3 l/s pour les importants rabattements.

La nappe du Sénonien est alimentée principalement par l'infiltration efficace des eaux de pluies, au niveau des zones d'affleurement des niveaux calcaires (plateau des phosphates), ou aussi alimentée par drainance à partir des autres aquifères du complexe.

Les valeurs disponibles de la qualité des eaux de la nappe, montrent une salinité basse avec un résidu sec qui varie de 300 à 800 mg/l. Ces éléments également restent insuffisants pour caractériser une ressource qui subit certainement de fortes variations dans l'espace.

b) Piézométrie de la nappe

La figure ci-dessous, représente une carte piézométrique de la nappe, qui montre que l'écoulement général de la nappe se fait globalement du Nord-Est vers le Sud-ouest,

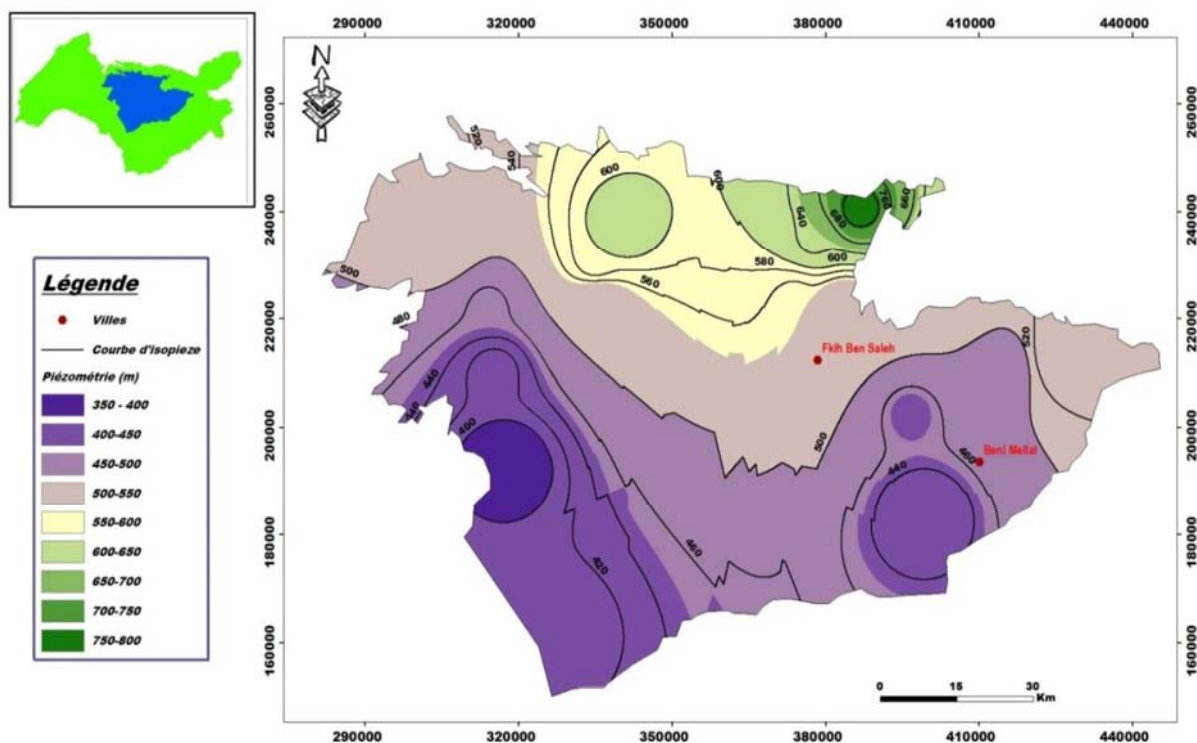


Figure 11: Carte piézométrique de la nappe profonde du Sénonien de Tadla

c) Structure générale de l'écoulement

Concernant la partie libre du sénonienne l'écoulement se fait du Nord vers le Sud jusqu'aux environs du Secteur Fkih Ben Salah- El Brouj, puis elle s'écoule vers le Sud-ouest. La morphologie de la surface piézométrique à l'Oued du secteur Khouribga–El Brouj, montre une ligne de partage des eaux orientée NE-SW. De ce fait, la partie située à l'Ouest de cette ligne, l'écoulement est orienté vers le Sud-Ouest ne participe pas alors à l'alimentation de la nappe du côté de la plaine du Tadla. L'écoulement s'effectue vers le sud-sud-est à l'Est de cette ligne.

I.4.2.3 L'aquifère du Turonien

Le Turonien s'étend sur une superficie de 10000 km², dans le plateau des phosphates elle est libre, et captive sous la plaine de Tadla [175]. Dans la zone de Tadla cette nappe joue un rôle très important, car elle assure l'alimentation en eau potable des villes de Khouribga notamment et Fquih Ben Saleh [168], il est délimité :

- au Sud-ouest par le massif des Jbilet ;
- à l'Ouest par les Rhamna ;
- au Sud et au Sud-est par le domaine Atlasique ;
- au Nord-est par le massif hercynien de la Meseta marocaine septentrionale ;
- au Nord par la Meseta côtière séparée du plateau des phosphates par la flexure nord-est/sud-ouest de Settat.

Le Turonien représente l'aquifère le plus productif et le plus généralisé de toute la plaine de Tadla, puisque le Turonien participe de plus de 90% à l'alimentation en eau potable des principales agglomérations de la région, cet aquifère constitue le château d'eau du bassin.

Au nord le réservoir du Turonien est constitué par des calcaires dolomitiques et des calcaires, au sud il est constitué par des dolomies marneuses voire évaporitiques du Cénomano-Turonien [176]. L'aquifère du Turonien est d'une épaisseur variante de 20 m au niveau des affleurements à 80 m au Sud en bordure du domaine Atlasique voire localement 100m. Le réservoir au Sud s'enfonce progressivement avec un accroissement de sa puissance dans la partie subsidence, alors que vers le Nord, il présente une structure sub-tabulaire [177].

a) Piézométrie de la nappe

La figure ci-dessous, représente la carte piézométrique de la nappe, qui montre que l'écoulement général de la nappe se fait du Nord vers le Sud, et la surface piézométrique apparaît complexe et permet de différencier trois régions à comportements piézométriques différents.

Au Nord du bassin correspondant au plateau des phosphates à partir des calcaires affleurant au niveau d'Oued Zem et de Boujaad, la nappe circule du Nord vers le Sud. Elle se caractérise par des courbes parallèles et serrées, qui indiquent un fort gradient hydraulique, le niveau piézométrique est situé entre 580m et 660m. Vers l'Ouest et Sud-Ouest du plateau, à cause de la faible productivité de la nappe liée à la faible recharge de l'aquifère, les points d'eau même de reconnaissance sont rares et l'affleurement est très réduit. Dans la partie Sud du bassin qui correspond à la plaine du Tadla dont la nappe circule approximativement du Nord-Est vers le Sud-Ouest, les courbes isopièzes sont énormément plus espacées et les gradients hydrauliques sont relativement très faibles témoignant d'une bonne perméabilité et de l'augmentation de la puissance des calcaires turoniens, dans cet endroit le niveau piézométrique est situé entre 260 m et 400m.

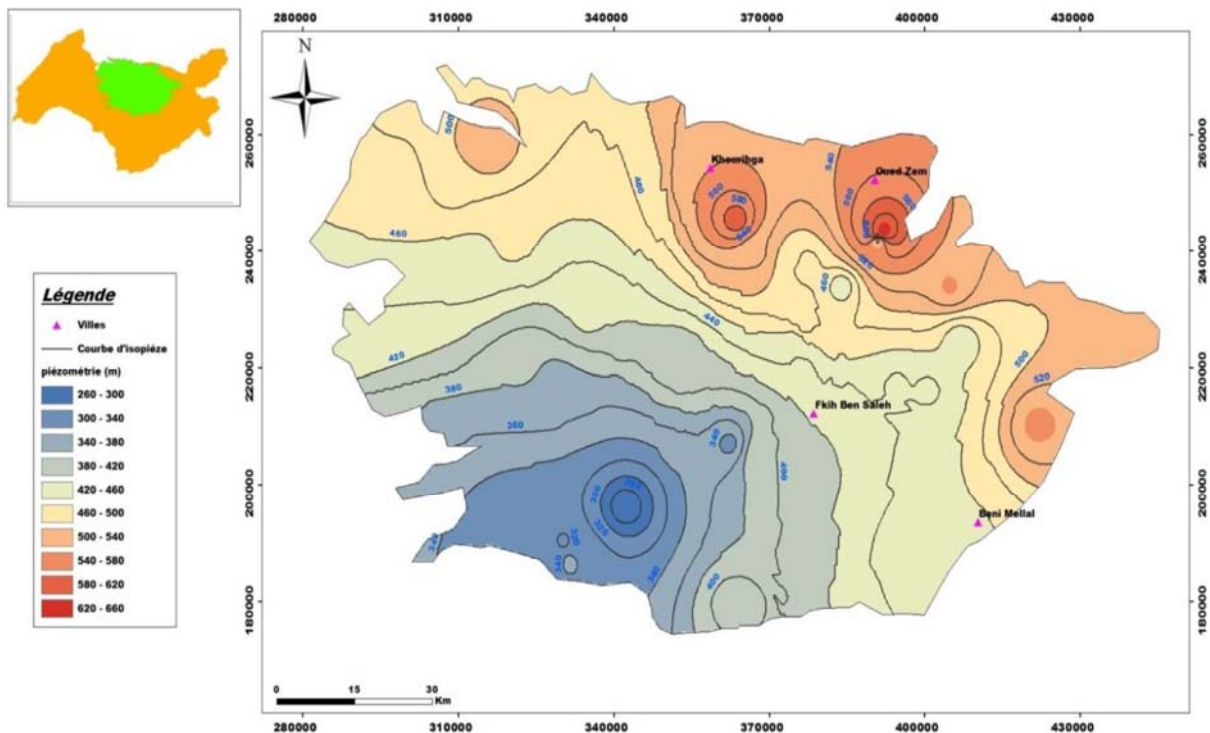


Figure 12: Carte d'évolution de la piézométrie de la nappe du Turonien

b) Caractéristiques hydrodynamiques

Les caractéristiques hydrodynamiques du Turonien sont relativement peu disponibles, la densité des points de mesures existants est faible, ce qui rend leur interprétation relativement délicate.

❖ La transmissivité

Pour le Turonien, la distribution géologique des valeurs de la transmissivité est caractérisée selon l'état de la nappe, libre ou captive. En général, les caractéristiques hydrodynamiques du réservoir sont bonnes. D'une part, il y a des zones à transmissivités faibles comprises généralement entre 10^{-6} et 10^{-3} m²/s dans la majeure partie du plateau des phosphates et dans la partie septentrionale de la plaine du Tadla. Dans ces deux secteurs les gradients hydrauliques sont relativement forts. D'autre part les zones de bonnes transmissivités qui sont généralement supérieures à 10^{-3} m²/s, mesurées dans les secteurs situés entre Kasba Tadla et Fkih Ben Salah et au Sud-Est d'El Borouj. Ces valeurs sont liées à la bonne perméabilité de fissure de l'aquifère turonien à ces lieux [178].

❖ Les coefficients d'emmagasinement

Les valeurs du coefficient d'emmagasinement disponibles présentent une très grande variation de la capacité d'emmagasinement de l'aquifère, ces valeurs sont comprises généralement entre 10^{-5} et 10^{-1} avec une moyenne de l'ordre de 10^{-3} . L'analyse des productivités hydrauliques de la nature lithologique du degré de fracturation et de l'épaisseur saturée de l'aquifère turonien ; nous a permis de distinguer trois zones de capacité d'emmagasinement différentes :

- ✓ **Zone 1** : au Sud de la plaine du Tadla, là où la nappe captive généralement circule dans des formations calcaires marneuses puissantes avec des productivités moyennes, les valeurs du coefficient d'emmagasinement sont plus importantes ;
- ✓ **Zone 2** : située dans le plateau des phosphates là où la nappe libre circule dans des calcaires faiblement épais et relativement fissurés, et les productivités hydrauliques sont assez moyennes, les valeurs du coefficient d'emmagasinement dans cette zone sont généralement moyennes ;
- ✓ **Zone 3** : au Nord de la plaine du Tadla, là où la nappe captive circule dans des calcaires faillés et fortement fissuré, et les productivités hydrauliques sont les plus importantes, les valeurs du coefficient d'emmagasinement sont les plus faibles.

c) Recharge

Les origines possibles de l'alimentation de la nappe du Turonien sont multiples, dont l'importance relative varie selon les régions du bassin, on distingue :

- infiltration efficace des eaux de pluie à partir de la surface;
- infiltration des eaux de surface notamment à partir de l'oued Oum Er-Rbia ;
- drainages verticaux à partir des aquifères sous ou sus-jacents ;
- drainages latéraux en provenance des bordures particulièrement atlasiques.

d) Qualité des eaux

❖ Température

Les valeurs de la température des eaux du Turonien varient entre 21 et 39°C avec une moyenne de 25.5°C, les valeurs les plus élevées sont marquées dans la région de Fkih Ben Salah et dans le Nord de Dar Ould Zidouh, tandis que les faibles valeurs sont notées dans le plateau des phosphates (Boujaad-Oued Zem) et à l'ouest de la Tassaout aval (anticlinaux Mizoua et Bou Ghazi) là où l'aquifère turonien affleure en surface [178].

❖ Conductivité électrique

Les valeurs de la conductivité électrique généralement varient entre 450 et 3000 $\mu\text{s}/\text{cm}$, selon l'analyse des données de l'ensemble des points d'eau captant le Turonien.

I.5 Cadre climatologique

De par sa situation géographique entre le Haut Atlas et les plateaux de phosphate, la plaine du Tadla est à une altitude moyenne de 400 m, et en raison de son éloignement de la mer, la plaine se caractérise par un climat très continental de type aride à semi-aride, avec une saison sèche qui s'étend du mois d'avril à septembre tandis que la saison humide s'étend d'octobre à mars. L'été est très chaud à cause des vents brûlants du sud-ouest-est (chergui) qui font monter les températures au-dessus de 40°C, néanmoins, dans les dernières années cette organisation saisonnière devient irrégulière sous l'effet des changements climatiques. Généralement ce climat est influencé par la température et les précipitations irrégulières.

Les données climatologiques traitées dans ce rapport concernant celles de la station météorologique d'Ouled Gnaou située dans les bēni Moussa et est sous la régie de l'ormvat.

I.6.1 Les précipitations

La plaine de Tadla est caractérisée par une variabilité intra et inter-annuelle des précipitations. La période 1970 à 2015 montre une variabilité considérable de la moyenne des précipitations dans la plaine (Fig. 13). Ainsi elle dépasse 45 mm au mois de Janvier, Mars et Novembre, alors qu'elle n'est que de 1,18 mm en Juillet, et 2,33 en Aout.

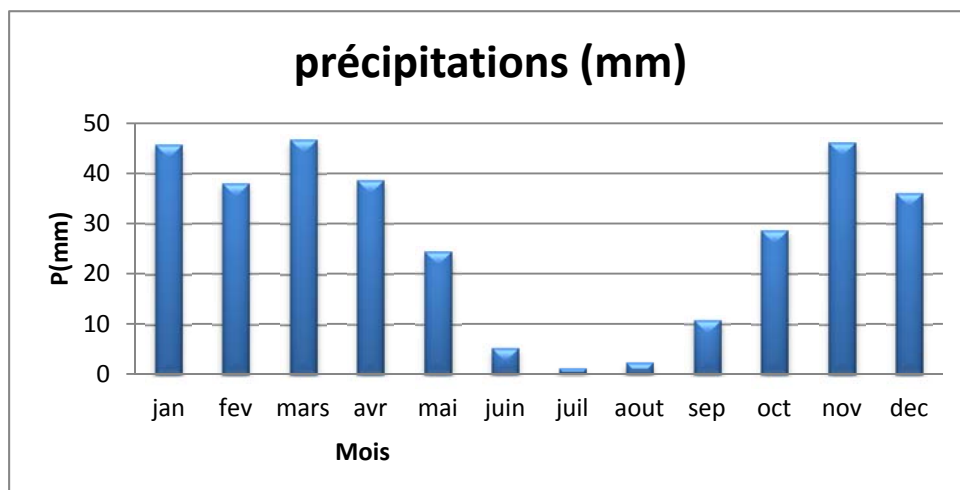


Figure 13: Précipitations moyennes mensuelles de la plaine (1970-2015)

Au niveau de la plaine de Tadla, le diagramme des cumuls pluviométriques annuels des mêmes années montre une abondance des précipitations qui est plus de 600 mm pour l'année 1971 et plus de 500 mm pour l'année 1996, cependant la pluviométrie annuelle moyenne est d'une normale de 380 mm (Fig. 14).

Les précipitations dans cette zone suivent un régime pluviométrique caractérisé par une période pluvieuse de huit mois (octobre à mai) et pouvant atteindre neuf mois en s'approchant de la montagne (septembre à mai).

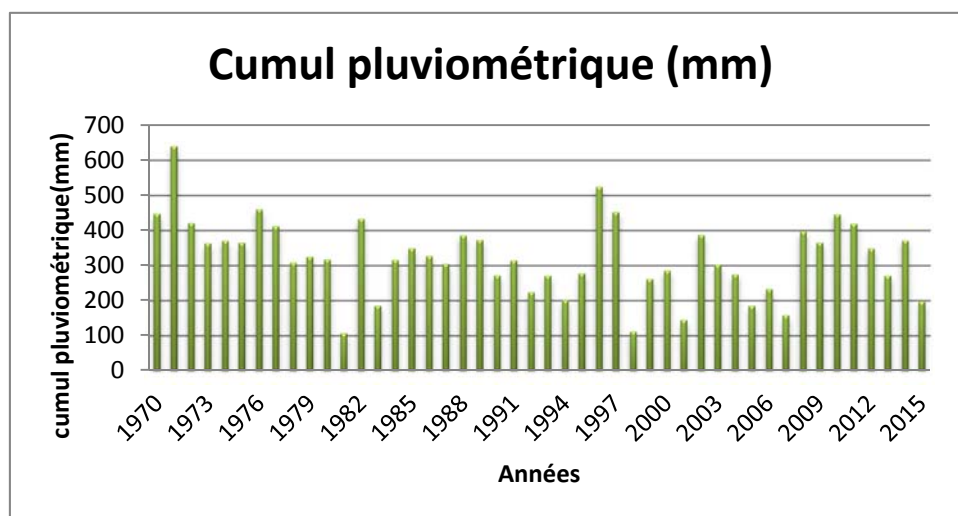


Figure 14 : Cumuls pluviométriques annuels de la plaine de Tadla (1970 à 2015)

Dans le périmètre de Tadla, les précipitations sont très variables, une étude fréquentielle des précipitations a montré que :

- 3 années sur 10 la pluviométrie est < 250 mm ;
- 4 années sur 10 la campagne agricole est normale avec une pluviométrie comprise entre 250 et 350 mm ;
- 3 années sur 10 la pluviométrie est > 350 mm L'évapotranspiration moyenne est de 3,6 mm/j, variant de 1 à 7 mm/j, elle est de 1800 mm/an. [223]

I.6.2 Température

Contrairement aux précipitations, les températures mensuelles moyennes, minimales et maximales recueillies de 1970 à 2015 au niveau de la plaine de Tadla (Fig. 15), s'avèrent relativement régulières d'une année à l'autre sauf pour l'année 2015.

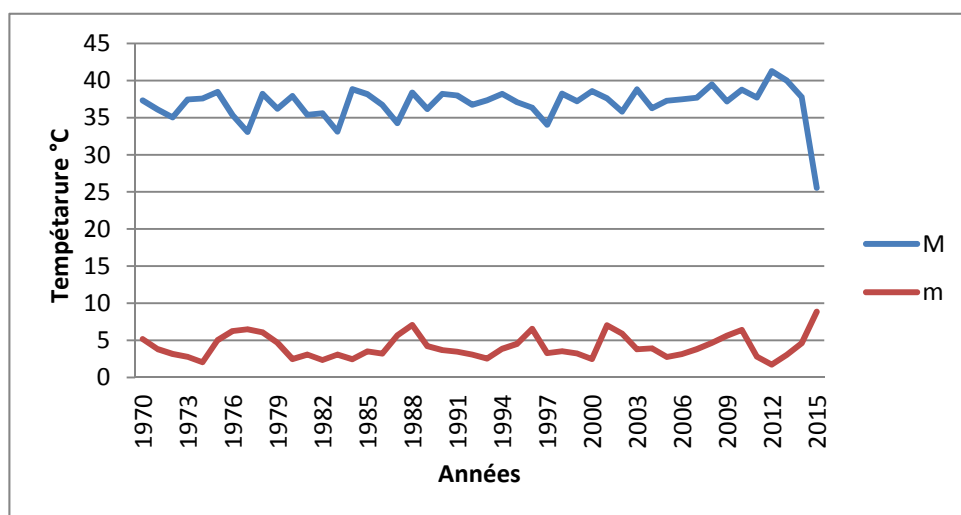


Figure 15: Températures moyennes minimales et Maximales de la plaine (1970-2015)

Les températures s'élèvent progressivement à partir du mois de Mars pour atteindre le maximum en Juillet-Août et s'abaissent à partir du mois de Septembre, pour atteindre le minimum en décembre-Janvier.

L'été est très chaud à cause des vents brûlants du sud-est "chergui" qui font augmenter la température au-dessus des 40 °C, vagues de chaleur se terminant parfois par de violents orages.

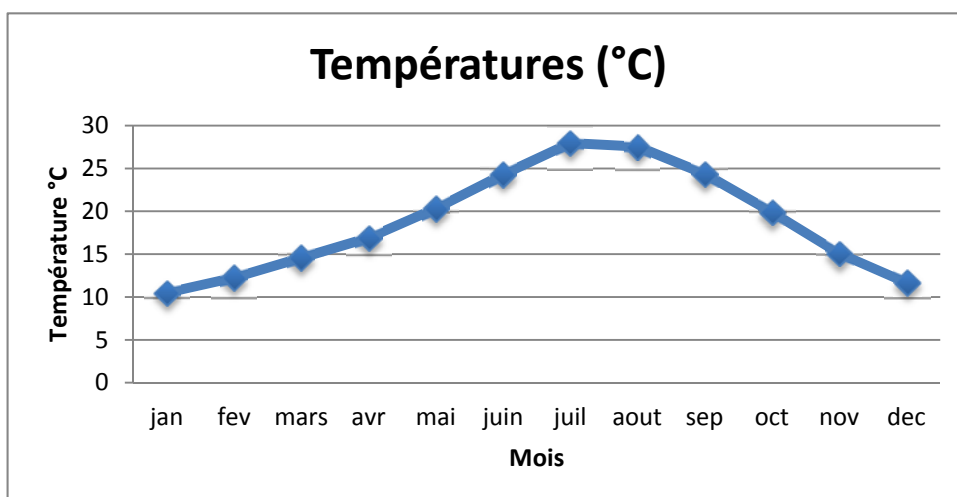


Figure 16: Températures moyennes minimales et Maximales de la plaine (1970-2015)

I.6.3 Diagramme ombrothermique

Les diagrammes ombrothermiques, montrent une variation de la période sèche au cours des mêmes années due à un changement important de la période pluvieuse. (Voir les annexes).

I.6.4 Indice d'aridité

L'indice d'aridité utilisé est celui de de Martonne (1942), il est en fonction de la température moyenne annuelle T (en °C) et de la hauteur annuelle des précipitations P (en

$$\text{mm}): I = \frac{P}{T+10}$$

Avec :

I : indice d'aridité

P : précipitation annuelle en mm

T : température moyenne annuelle en °C.

Tableau 22: La relation entre l'indice d'aridité de Martonne et le type de climat

Indice d'aridité	Type de climat
30-20	Milieu tempéré
20-10	Milieu semi-aride
10-5	Milieu aride
<5	Milieu hyper-aride

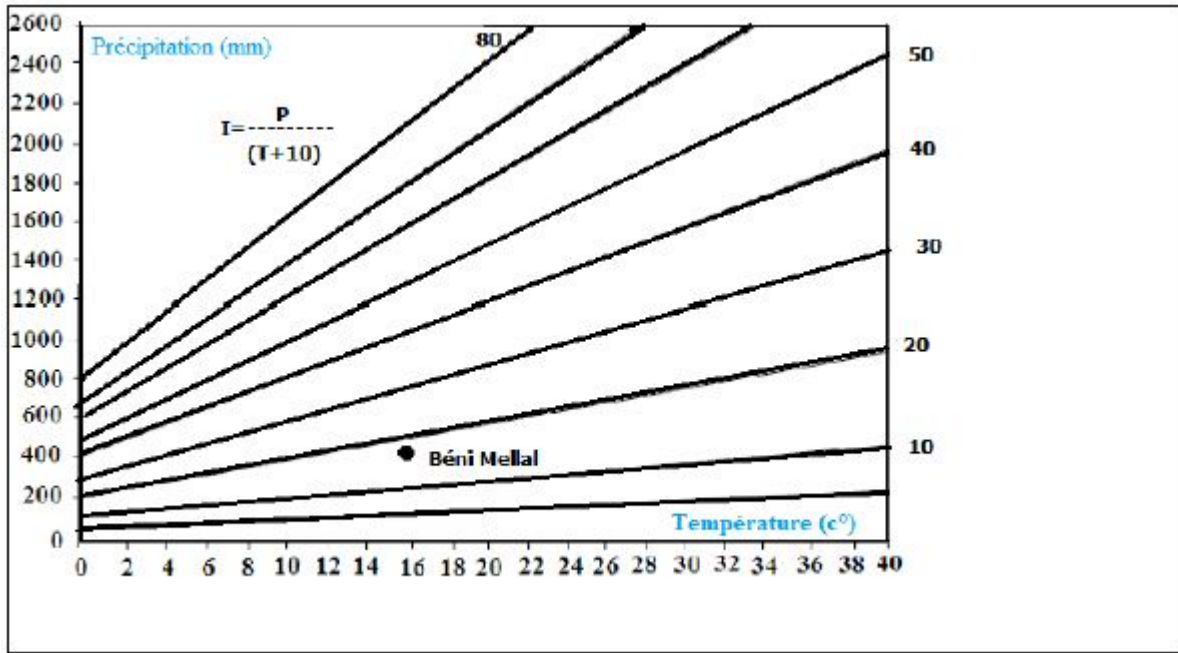


Figure 17: Indice d'aridité de Martonne de la plaine de Tadla

L'indice d'aridité de la plaine du Tadla selon Martonne est égale à 12,07mm/°C (fig.17), cette valeur nous indique alors que la zone d'étude est sous l'influence d'un climat de type aride à semi-aride.

1.6.5 Evaporation

L'évaporation est l'une des composantes principales du cycle hydrologique ; les paramètres climatiques : L'insolation, la température, l'hygrométrie et les vents jouent un rôle important dans les quantités annuelles évaporées, l'étude du paramètre d'évaporation est importante pour connaître le régime climatique, il est mesuré par l'évaporomètre.

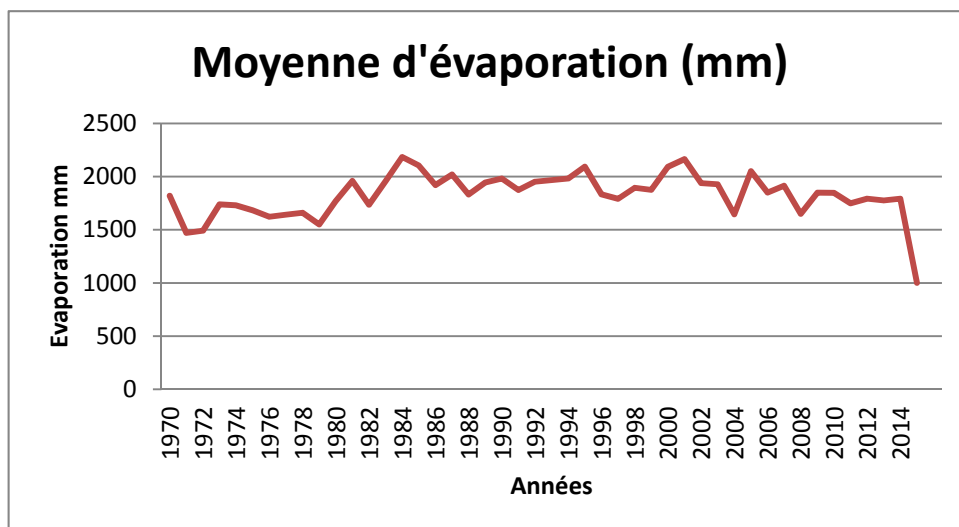


Figure 18: Moyenne de l'évaporation de la plaine (1970-2015)

L'analyse des données enregistrées montre une quantité annuelle moyenne évaporée de l'ordre de 1828 mm/an la quantité maximale est 2183,91 mm enregistré en 1984 tandis que la quantité minimale est 1000,70 mm enregistrée en 2015. La moyenne mensuelle de l'évaporation enregistrée présente une même variation au cours des mois, les valeurs minimales sont enregistrées pendant les mois de décembre, janvier, février et Mars tandis que les valeurs maximales sont enregistrées au cours des mois juin, juillet et août.

I.6.6 Evapotranspiration

L'évapotranspiration est la quantité de vapeur d'eau transférée dans l'atmosphère par transpiration des plantes et par évaporation au niveau du sol, de surfaces d'eau libre et autres surfaces interceptant la pluie [224]. L'étude de l'évapotranspiration exige dès le départ trois concepts essentiels : ETP/ ETR/ ET₀

ET₀ est l'évapotranspiration de référence, elle était définie comme le degré d'évapotranspiration d'une surface recouverte d'herbe d'une hauteur uniforme de 8 à 15 cm, en pleine croissance, recouvrant complètement le sol et ne souffrant pas d'un manque d'eau[179].

I.6.6.1 Evapotranspiration potentielle ETP

L'évapotranspiration potentielle représente la valeur maximale d'évaporation plus la transpiration pour un climat donné, en fonction des caractéristiques énergétiques et dynamiques de l'atmosphère c'est-à-dire suffisamment d'eau pour satisfaire la demande évaporatoire.

Plusieurs formules classiques sont utilisées pour estimer l'ETP à savoir la méthode empirique de Serra et celle de Thornthwaite.

- Méthode de Thornthwaite (1948)

D'après Thornthwaite (5918) le calcul de l'évapotranspiration potentielle se fait selon la

formule suivante : $ETP = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a F(\lambda)$

Avec :

t : température moyenne mensuelle (°C)

ETP : évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle (en mm)

F(λ) : Coefficient de correction tenant compte de la latitude et du mois

T_m : Moyenne interannuelle des températures du mois (en °C)

I : Somme des 12 indices thermiques mensuels $I = \sum_{K=1}^{12} IK$ avec $IK = (tk/5)^{1.154}$

$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} I + 0,49$

La valeur de l'évapotranspiration annuelle est la somme des 12 valeurs d'évapotranspiration potentielle mensuelles.

Tableau 23: Calcul de l'ETP mensuelle et annuelle par la méthode de Thornthwaite (Source : ABHOR 1985-2016)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Total
T	26,15	21,41	16	12,40	12,31	13,67	16,29	18,06	21,98	25,81	29,84	30,44	****
K	1,03	0,98	0,88	0,87	0,89	0,86	1,03	1,08	1,19	1,19	1,21	1,15	****
I	12,24	9,04	5,84	3,95	3,91	4,59	5,98	6,99	9,41	12,00	14,95	15,41	****
ETP	120,9	74,56	35,8	20,24	20,40	24,75	43,35	56,83	95,92	135,9	189,2	187,8	1005,2

L'analyse des données de l'évapotranspiration potentielle par La méthode de Thornthwaite montre que les mois de décembre à février présentent des valeurs relativement basses d'ETP, par contre les mois de Juin à septembre présentent des valeurs relativement élevées(Tableau23).

I.6.6.2 Evapotranspiration réelle ETR

L'évapotranspiration réelle représente la perte de vapeur d'eau effective au-dessus de la surface étudiée. Lorsque la teneur en eau du terrain est suffisante, l'ETR=ETP En cas de déficit, l'ETR est inférieure à l'ETP.

- **La formule de Turc annuelle**

Elle permet de calculer l'ETR en tenant compte des valeurs moyennes annuelles de la température et des précipitations. $ETR = P / \sqrt{(0.9 + (\frac{P}{L})^2)}$

Avec :

$$L = 300 + 25T + 0,05T^3$$

L : pouvoir évaporant de l'atmosphère.

ETR : évapotranspiration réelle annuelle en (mm)

T : température moyenne annuelle (°C).

P : hauteur de précipitation annuelle en (mm)

- **Méthode de Thornthwaite**

L'évapotranspiration réelle mensuelle (ETR) est calculée par la comparaison des valeurs de l'évapotranspiration potentielle mensuelle (ETP) et des hauteurs des précipitations mensuelles (P).

La quantité d'eau correspondant à P-ETP est stockée dans le sol jusqu'à saturation de ce dernier, la partie de l'« excédent » dépassant éventuellement la réserve cumulée maximale en eau du sol, est disponible pour le ruissellement et l'infiltration.

La valeur de l'évapotranspiration réelle annuelle est la somme des 12 valeurs d'évapotranspirations réelles mensuelles.

Les valeurs de l'ETR obtenues par cette méthode sont données par le tableau ci-dessous :

Tableau 24: Bilan de Thornthwaite, entre 1985 et 2015 (Source : ABHOR 1985-2016)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc.	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	TOT
T °C	26,1	21,4	16,0	12,4	12,3	13,7	16,3	18,1	22,0	25,8	29,8	30,4	20,39
P	14,0	37,0	71,0	54,1	55,1	54,5	60,1	48,8	32,7	9,1	1,7	4,3	442,2
ETP (mm)	120,94	74,56	35,79	20,24	20,40	24,75	43,35	56,83	95,92	135,89	189,17	187,84	1005,7
RFU	0	0	34,91	50	50	50	50	41,17	0	0	0	0	-
ETR	14,3	37,5	35,4	18,9	19,4	26,9	43,3	52	71,4	9,2	0,9	3,1	332,3
Déficit	106,64	37,06	-	-	-	-	-	-	22,5	126,79	187,47	183,54	480,46
Excédent	-	-	-	16,77	33,7	27,6	16,6	-	-	-	-	-	94,67

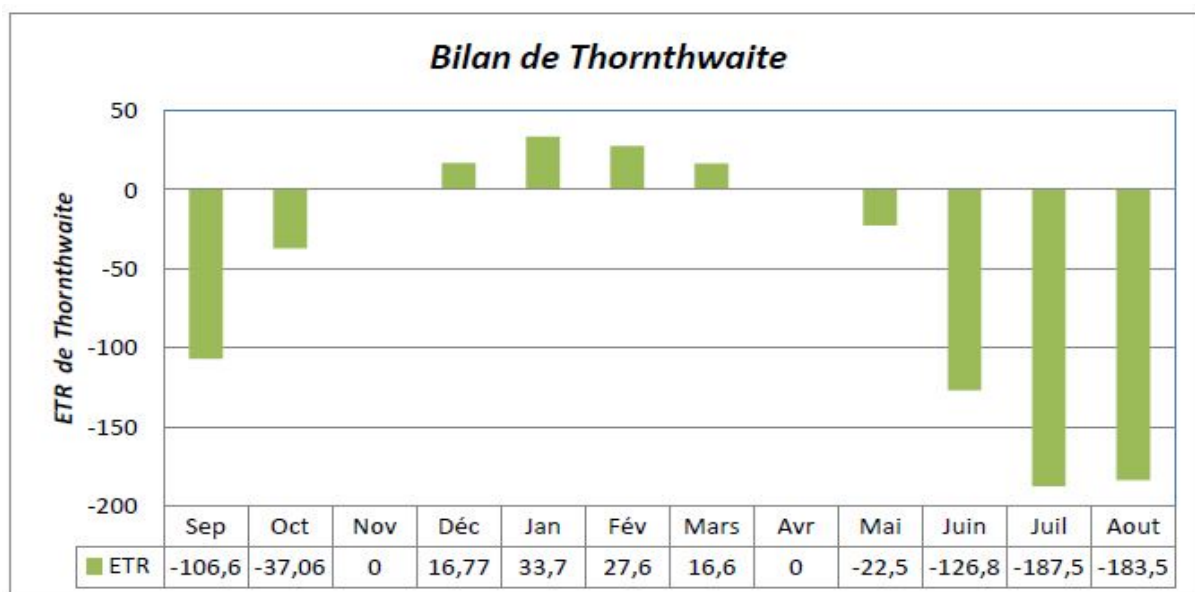


Figure 19: Bilan de Thornthwaite, entre 1985 et 2016 [161]

A partir du bilan de Thornthwaite (fig 19), on remarque que durant la période allant de Mai à Novembre, il y a un déficit très important qui peut atteindre 480mm, pourtant la région connaît un excédent d'eau s'étend de Décembre à Mars où la pluviométrie satisfait les réserves hydriques du sol (réserve facilement utilisable RFU et RFU 2/3 RU) qui atteint son maximum (50mm) car le climat de la région est semi-aride.

I.6.7 Les vents

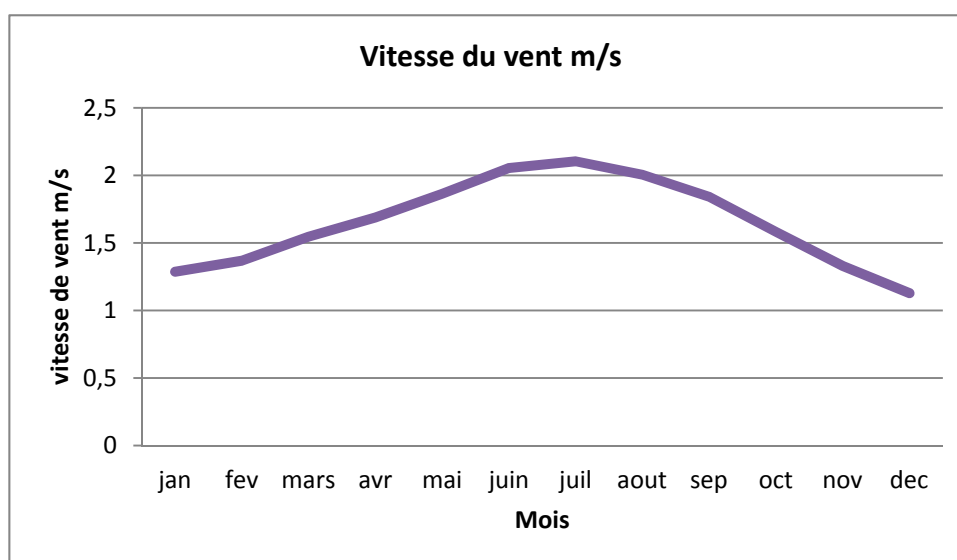


Figure 20: Variations des moyennes mensuelles de Vent (1970-2015)

Les variations moyennes mensuelles des vents enregistrées au cours des années montrent une augmentation des valeurs en été, tandis que les valeurs minimales sont enregistrées pendant les mois Décembre, Janvier.

De Mai à Octobre, les vents soufflent du Sud-Ouest et de l'Ouest, le plus souvent en fin d'après-midi et sont dus à la rupture de l'équilibre thermique entre la montagne et la plaine, ils sont alors secs et chauds. Les vents les plus fréquents d'Octobre à Mai sont les vents de Nord-est, secs et froids et les vents du Sud-ouest qui, au contraire, apportent les pluies.

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES

I. Echantillonnage, conservation et transport

Notre étude est réalisée dans la zone couvrant le périmètre irrigué du Tadla, qui est connue par une grande activité agricole et un usage fort des intrants agricoles (produits phytosanitaires et fertilisants).

I.1. Méthode d'échantillonnage

Une attention particulière a été accordée à la propreté et à la nature du matériel utilisé pour le stockage des échantillons, car l'étape d'échantillonnage est une opération primordiale qui influence instantanément la qualité des résultats analytiques obtenus. Un total de 80 points d'eau a été choisi afin de couvrir toute la zone d'étude et d'évaluer l'état des eaux souterraines de la nappe de Tadla (Fig. 21).

Les échantillons d'eau ont été collectés soigneusement dans des bouteilles en polyéthylène, préalablement nettoyées et rincées avec l'eau de puits, le volume moyen de chaque échantillon est de 1500ml.

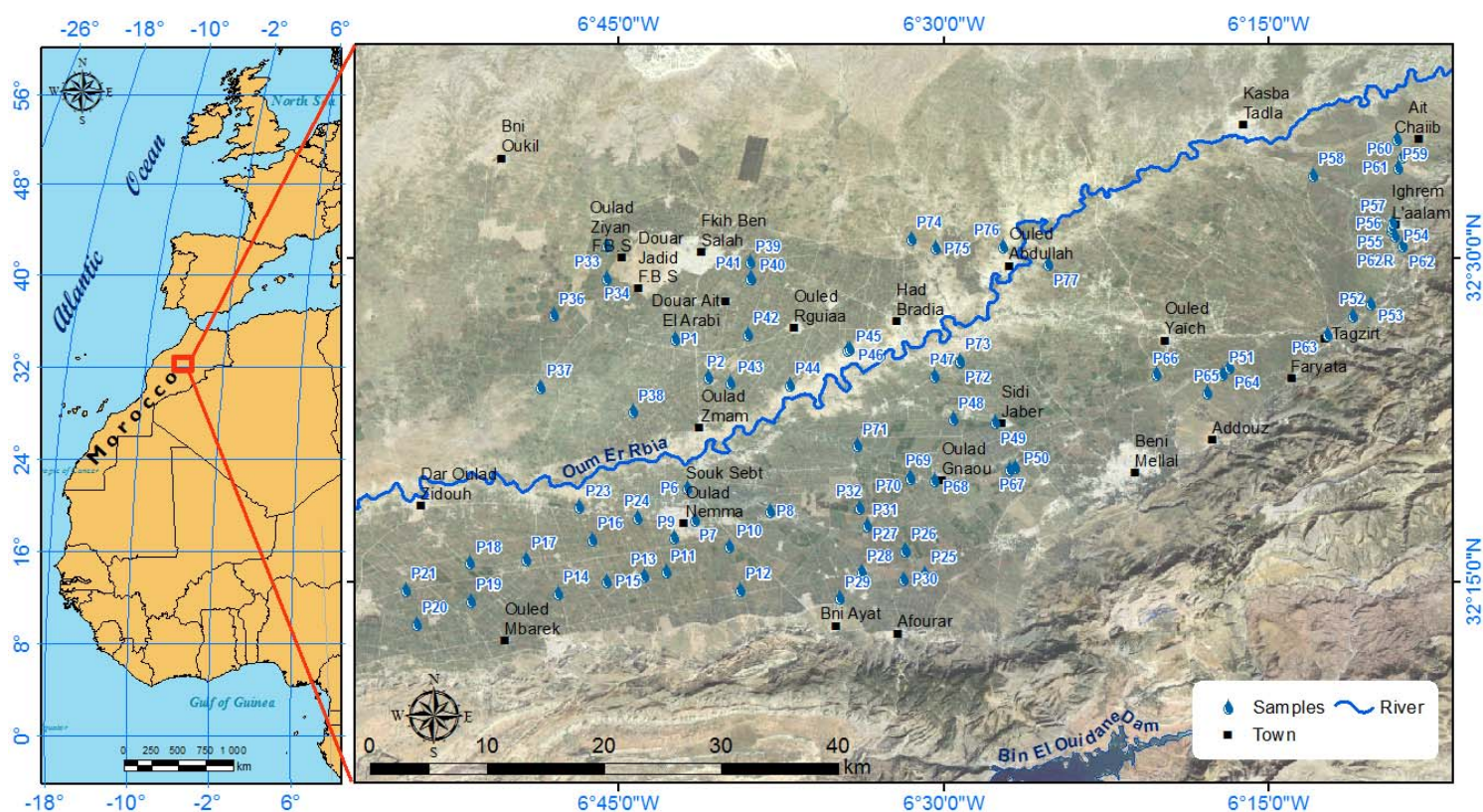


Figure 21: Localisation géographique des puits objets de l'étude

I.2. Conservation et transport des échantillons

Le temps s'écoulant entre l'échantillonnage et l'analyse physico-chimique doit être court. Selon le type de dosage, des précautions particulières lors de la manipulation de l'échantillon sont nécessaires, pour éviter toute modification rapide des paramètres de l'eau en fonction du temps. En effet, d'après Balland et *al.*, (1987), [180] il y a des substances qui peuvent :

- ✓ Se volatiliser (cyanures, composés chlorés, sulfures);
- ✓ Se transformer sous l'action de micro-organismes ;
- ✓ Etre oxygénés par l'oxygène de l'air contenu dans le flacon ou l'oxygène dissous dans l'eau de l'échantillon ;
- ✓ S'adsorber sur parois des récipients ou particules solides contenues dans l'échantillon (éléments minéraux ou organiques à l'état de trace);
- ✓ Se décomposer à la lumière.

Les échantillons sont ensuite transportés dans une glacière portative jusqu'à leur arrivée au laboratoire, où ils seront conservés au réfrigérateur.

I.3. Mesures sur le terrain

Les paramètres suivants ont été mesurés in situ au moyen d'appareillage de précision spécifique.

- La conductivité électrique en ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
- La température en ($^{\circ}\text{C}$)
- Le potentiel d'Hydrogène (pH)
- La piézométrie ou Niveau statique (m)
- L'Oxygène dissous (mg/l)

II. Méthodes d'analyse des échantillons

II.1. Analyses des paramètres physico-chimiques

Après la collecte des échantillons, différentes analyses ont été effectuées en suivant des modes opératoires bien définis.

➤ Demande chimique en oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène (DCO) représente la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder la matière organique (biodégradable ou non) d'une eau, à l'aide d'un oxydant (le bichromate de potassium), la DCO s'exprime en mg/litre d'oxygène consommé. Ce paramètre offre une représentation plus ou moins complète, des matières oxydables présentes dans l'échantillon. On utilise la méthode volumétrique avec le dichromate de potassium.

Principe

Le procédé consiste en l'oxydation de la matière oxydable par un excès de dichromate de potassium. Cette oxydation se réalise en milieu acide (acide sulfurique (H₂SO₄), en présence de sulfate d'argent (Ag₂SO₄) et de sulfate de mercure (HgSO₄), à 150°C pendant 2H dans un ballon muni d'un réfrigérant. L'excès de dichromate est titré par une solution de sulfate de fer II et d'ammonium.

Mode opératoire

Toute la verrerie doit être nettoyée et rincer à l'eau distillée. On répètera ce geste à chaque utilisation.

□ Introduire dans le tube rodé, 10 ml d'échantillon, 5 ml de dichromate de potassium, 15ml de sulfate d'argent. Puis on met le tube dans la plaque chauffante préalablement allumée, on place le réfrigérant, on ouvre le robinet, et on attend 2 heures.

□ Pendant ce temps, on fait la vérification de la solution de sulfate de fer et d'ammonium : dans un erlenmeyer on introduit, 5 ml de dichromate de potassium, 100 ml de solution d'acide sulfurique, 2 – 3 gouttes de ferroïne. Puis on remplit, la burette de solution de fer et d'ammonium. On procède au titrage et on note le volume de solution de fer et d'ammonium au quel il y a le virage au rouge. On calcule le titre de la solution : $T = (s.dichromate\ de\ potassium) * 0,4 (de\ titrage) * 6$. Il s'exprime en mol/L.

□ Au bout des 2 heures, éteindre la plaque, fermer le robinet, retirer le réfrigérant, retirer le tube de la plaque chauffante et laisser refroidir. Verser le contenu du tube rodé dans un erlenmeyer, rincer le tube avec 75 ml d'eau distillée, verser cette eau de rinçage dans l'erlenmeyer en prenant soin de ne rien perdre de la quantité. Puis y ajouter 2 – 3 gouttes de ferroïne. On fait le titrage avec la solution de fer et d'ammonium. On note le volume.

□ On procède de la même manière pour l'essai à blanc, en remplaçant l'échantillon par l'eau distillée.

Expression des résultats

$$DCO = 8000 * (V1 - V0) * T * V \text{ en mg/L}$$

Avec : V1= volume de solution de fer et d'ammonium nécessaire au blanc

V0= volume de solution de fer et d'ammonium nécessaire à l'échantillon

T= titre de la solution de fer et d'ammonium

V= volume de la prise d'essai

➤ Matière organique

La détermination de la matière organique repose sur l'oxydabilité au KMnO_4 , l'eau est portée à ébullition en présence d'une solution diluée de permanganate de potassium dont l'excès est dosé après 10 minutes exactement d'ébullition.

➤ Demande biochimique en oxygène (DBO5)

La demande biochimique en oxygène (DBO) est définie comme étant la quantité d'oxygène consommée lors de la dégradation de la matière organique. Elle se mesure en général à l'obscurité, à 20°C et pendant 5 jours; c'est ce qu'on appelle DBO5.

Principe

Mesure de l'oxygène consommé en cinq jours par un échantillon dilué avec une eau saturée en oxygène,ensemencée avec des germes, puis placé dans une enceinte thermo statée à 20°C .

Mode d'opérateur

- Introduire 432 ml dans une bouteille OXITOP
- Ajouter 10 gouttes de nitrification INHIBOITOR (5 g/l $\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_2\text{S}$)
- 3 pastilles de sodium hydroxyde pur

Après le réglage des chiffres de la bouteille OXITOP, placé ce dernier dans thermo statée et laisser 5 jours.

➤ Dosage de l'azote nitrique ou nitrate

Le nitrate se forme naturellement par combinaison de l'azote (N) et de l'oxygène (O) du sol. Sa formule chimique est NO_3^- , il s'exprime en mg/l. On utilise la spectrophotométrie par absorption de la lumière à 415 nm.

Principe : En présence de salicylate de sodium, les nitrates donnent un composé qui, en présence de tartrate double de sodium et de potassium, coloré en jaune : le paranitrosalicylate de sodium, dont on peut connaître la concentration en mesurant l'absorbance de la solution.

Mode opératoire

Etablissement de la gamme étalonnage :

On introduit successivement dans une série de bécher bien étiqueté :

Numéro de capsule	T	1	2	3	4
Solution étalon d'azote nitrique à 5 ppm	0	1	2	5	10
Eau distillée	10	9	8	5	0
Correspondance en (mg/l) d'azote	0	0,5	1	2,5	5
Solution de salicylate de sodium	1	1	1	1	1

On ajoute 0,2 ml d'acide acétique dans chaque bécher, on attend 5 minutes, puis on fait évaporer à sec. On ajoute 1 ml de solution de salicylate de sodium dans chaque bécher et on fait à nouveau une évaporation à sec. On laisse refroidir.

□ Après refroidissement, on ajoute dans chaque bécher 1 ml d'acide sulfurique, en prenant soin d'humecter le résidu. On attend 10 minutes. Les 10 minutes passées, on ajoute 10 ml d'eau distillée et 10 ml d'ammoniaque dans chaque bécher.

□ On verse le contenu de chaque bécher dans des fioles de 25 ml, on rince le bécher avec un peu d'eau distillée, on renverse l'eau de rinçage dans les fioles ; on ajuste le tout à 25 ml avec de l'eau distillée.

Dosage de l'échantillon

On utilise une prise d'essai de 1ml et on procède comme pour la gamme étalonnage.

Expression des résultats

La lecture se fait à une longueur d'onde à 415 nm.

➤ Azote ammoniacal ou ammoniac

La présence d'azote ammoniacal dans une eau traduit un processus de dégradation incomplète de la matière organique, il s'exprime en mg/L, on utilise un dosage volumétrique après entraînement à la vapeur en milieu basique. L'analyse se poursuit par un dosage par titrimétrie avec un acide sulfurique.

Principe

Le procédé consiste en une distillation, qui permet de recueillir l'ammoniac dans une solution d'acide borique. Le borate d'ammonium est dosé par une solution d'acide sulfurique.

Mode opératoire

Toute la verrerie doit être nettoyée et rincer à l'eau distillée. On répètera ce geste à chaque utilisation.

□ Introduire dans le tube rodé, 50 ml d'échantillon, puis programmer l'unité d'entraînement à la vapeur pour une quantité de solution d'hydroxyde de sodium = 25 ml

□ On place à la sortie de l'unité un erlenmeyer contenant environ 5 ml d'acide borique.

□ On admet la vapeur pendant 10 minutes

□ Dans l'erlenmeyer contenant le distillat, on ajoute 2 à 3 gouttes d'indicateur, puis on titre avec la solution d'acide sulfurique

□ On procède de la même manière pour l'essai à blanc, en remplaçant l'échantillon par l'eau distillée.

Expression des résultats

$$NH_4 = 2(V_1 - V_0) * C * 1000 * 14 / V \text{ en mg/L}$$

Avec : V_1 = volume de solution d'acide sulfurique pour le dosage de l'échantillon

V_0 = volume de solution d'acide sulfurique pour le dosage de l'essai à blanc

C = concentration en mol/L de la solution d'acide sulfurique utilisée

V = volume de la prise d'essai

14 = masse atomique relative de l'azote

➤ Dosage des nitrites

Les nitrites correspondent aux sels de l'acide nitreux. Symbolisé par la formule NO_2^- , l'ion nitrite se différencie de l'ion nitrate par sa capacité de liaison avec les métaux, il s'exprime en mg/litre. On utilise la spectrophotométrie par absorption de la lumière à 538 nm.

Principe

On réalise une diazotation de la 4-amino benzène sulfamide (sulfanilamide) par les nitrites en milieu acide. Puis la copulation avec la naphthyléthylène diamine. On dose ensuite par spectrophotométrie d'absorption.

Mode opératoire

Etablissement de la gamme étalonnage

On introduit dans des fioles de 100 ml :

Numéro de capsule	T	1	2	3	4	5
Solution étalon de nitrite de sodium	0	1	2	5	10	20
Correspondance en (mg/l) de nitrite de sodium	0	0,5	1	2,5	5	10

On ajuste chaque fiole à 60 ml avec de l'eau distillée, puis on ajoute 10 ml de solution I et 6 ml de solution III. On place les fioles dans l'obscurité, à température ambiante pendant 5 minutes.

Puis on met 2 ml de solution II, on mélange et on les place à l'obscurité pendant 3 minutes à température ambiante.

On ajuste jusqu'au trait de repère avec de l'eau distillée.

Dosage de l'échantillon

Nous suivrons le même processus de la gamme d'étalonnage, avec une prise d'essai de 50 ml

Expression des résultats

La lecture se fera au spectrophotomètre à 538 nm.

➤ **Potassium K, Sodium Na, Calcium Ca, Lithium Li, et Barium Ba**

La détermination de ces éléments est basée sur la procédure suivante : l'échantillon est aspiré par une flamme, les résultats sont affichés sur le spectrophotomètre à flamme.

II.2. Analyse bactériologique

Les analyses bactériologiques ont été réalisées sur les mêmes échantillons d'eau des puits dans la zone d'étude. Elles ont été effectuées le jour même du prélèvement au laboratoire de l'ONEP. Les bactéries pathogènes analysées dans cette étude comprennent : les coliformes totaux (CT), les coliformes fécaux (CF) et les streptocoques fécaux (SF).

Des échantillons de l'eau de 100 ml ont été filtrés (taille des pores : 0,45µm) puisensemencées dans du chlorure de triphényltétrazolium (TTC) et Tergitol agar lactose qui est un milieu de culture sélectif pour les CF (AFNOR, 1998). Les coliformes fécaux (CF) et coliformes totaux (CT) ont été dénombrés après 24 h d'incubation à 44 ± 1 °C et à 37 ± 1 °C, respectivement.

Pour les streptocoques fécaux(SF), le milieu de culture sélectif utilisé est Slanetz et Bartley. Les SF ont été dénombrées après une incubation à 37 °C pendant 24 h. Le nombre total des bactéries a été déterminée sous forme d'unités formant des colonies par 100 ml (UFC/100ml).

II.3. Dosages des métaux lourds (ETM) par Spectrométrie d'Emission Atomique Couplée à un Plasma Induit (ICP-AES)

Préparation des échantillons

On prend 50 ml de l'échantillon, on y ajoute 1ml de l'acide nitrique, et 0,5 ml de l'acide chloridrique, puis on chauffe (bain marie) à 90-95 °C pendant 2h à 2h30, puis on ajoute 50 ml d'eau distillée.

Pour l'essai à blanc, l'échantillon est remplacé par l'eau distillée.

Les échantillons préparés, ont été soumis à des analyses des métaux lourds suivant : l'Aluminium (Al), le Fer (Fe), le Zinc (Zn), le Cuivre(Cu), le Manganèse (Mn), et le Nickel (Ni), et ce au moyen de la méthode de la Spectrométrie d'Emission Atomique Couplée à un Plasma Induit (ICP-AES) au centre des analyses au sein de la Faculté des sciences et techniques Béni Mellal.

La spectrométrie d'émission analytique est une méthode très sensible qui permet de mesurer les teneurs de presque tous les éléments qui sont présents dans les solutions aqueuses, organiques ou solides par l'appareil Ultima 2 Jobin Yvon et avec une limite de détection de 0,1917 ppb (ppb = µg/L). C'est un dispositif utilisé principalement en géochimie, ICP-AES

dérivant des initiales de l'appellation anglaise "Inductively Coupled Plasma- Atomic Emission Spectroscopy".

II.3.1. Principe et fonctionnement

Par l'intermédiaire d'une bobine d'induction, un générateur à haute fréquence est utilisé pour chauffer un courant d'argon et créer un plasma (gaz ionisé). La température atteinte est de l'ordre de 7000 à 8000 K. Au contact du plasma, l'échantillon, préalablement minéralisé, est réduit à l'état d'ions et d'atomes indépendants. Ces atomes excités par le plasma, réémettent l'énergie qu'ils ont obtenue sous forme d'un rayonnement électromagnétique qui traverse un système dispersif qui divise les différentes raies d'émission présentes dans le rayonnement. Chaque élément chimique possède un spectre optique caractéristique et l'intensité des raies émises par l'échantillon est proportionnelle à la concentration des éléments qu'il contient.

II.3.2. Les avantages de l'ICP

C'est une analyse rapide, multi élémentaire et simultanée d'une très grande sensibilité, pour la majorité des métaux. Les limites de détection de la mesure sont inférieures à 10 ppm ($\mu\text{g/L}$).

III. Traitement des données

III.1. Traitement statistique des données

Le traitement statistique des résultats obtenus a été réalisé à l'aide d'un outil fournis dans l'ACP, qui est l'abréviation de l'analyse en composantes principales (ACP), c'est une analyse statistique multivariée qui a été utilisée dans nos recherches. Cette méthode est une approche quantitative et indépendante de la classification des échantillons d'eau souterraine en fonction de leurs caractéristiques géochimiques et peut simplifier et organiser un grand ensemble de données afin de faire des regroupements utiles d'échantillons similaires ([181] ; [182]).

III.2. Système d'information géographique

Le Système d'Information Géographique (SIG) est un système permettant de visualiser ou de traiter des données référencées dans l'espace (objet à caractère géographique). Ainsi il permet de répondre aux besoins de décideurs en matière d'aménagement, de gestion, etc [183]

Actuellement, les SIG sont nécessaires et présentent les excellentes techniques de travail en matière d'hydrogéologie, de géologie, etc. Les fonctionnalités offertes par ces systèmes (représentation, visualisation, analyse, traitement et simulation ou modélisation) aident à prendre certaines décisions en matière de Géo-Environnement, à titre d'exemple [184].

Nous avons utilisé le SIG dans cette étude pour la réalisation des cartes de pollution des différents paramètres.

PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

CHAPITRE I : VARIATION SPATIOTEMPORELLE DES DIFFERENTS PARAMÈTRES ANALYSESDS EAUX SOUTERRAINES DE LA PLAINE DE TADLA

Les études concernant la qualité des ressources hydriques souterraines dans le Tadla sont multipliées en raison de la pollution de plus en plus critique, soit d'origine anthropique ou environnementale. La diversité des activités industrielles dans la région et l'absence dans la plupart des cas de procédés de traitement implique le rejet d'effluents industriels chargés de polluants inorganiques et organiques, surtout dans les oueds de la région. D'autre part, les lixiviats des décharges sauvages et le manque de station d'épuration des eaux usées sont forcément à l'origine d'un apport immense de polluants dans les diverses composantes de l'environnement. La zone d'étude est reconnue par ses activités agricoles, ce qui aggrave de plus en plus la pollution environnementale. Cependant, cette pollution reste au niveau des agglomérations, suite aux rejets domestiques, prononcée à l'usage abusif des pesticides et des engrais chimiques.

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à la qualité des eaux souterraines par l'analyse des paramètres physiques et chimiques au niveau de Tadla et la réalisation des essais lysimétriques dans la station d'ouled gnaou.

Pour cette étude hydrochimique, les données suivantes seront exploitées : L'analyse chimique de 80 puits (campagnes 2015-2016/2016-2017), concernant les éléments majeurs (Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), les éléments traces métalliques, et d'autres analyses (DCO, MO, DBO_5) complétées par des mesures de pH, de température, de l'oxygène dissous et de conductivité électrique (CE) in situ.

I. Résultats des paramètres physicochimiques

I.1. La température

La température est un facteur abiotique important. Sa mesure est nécessaire, étant donné le rôle qu'elle joue dans la dissociation des sels dissous, dans la solubilité des gaz, et dans la détermination du pH [185]. La température agit pareillement comme facteur physiologique sur la croissance et le métabolisme de la plupart des organismes vivant dans l'eau, notamment ceux microscopiques [185]. Elle est directement liée à la vitesse de dégradation de la matière organique [186]. Les températures de l'eau sont étroitement dépendantes de la température de l'air.

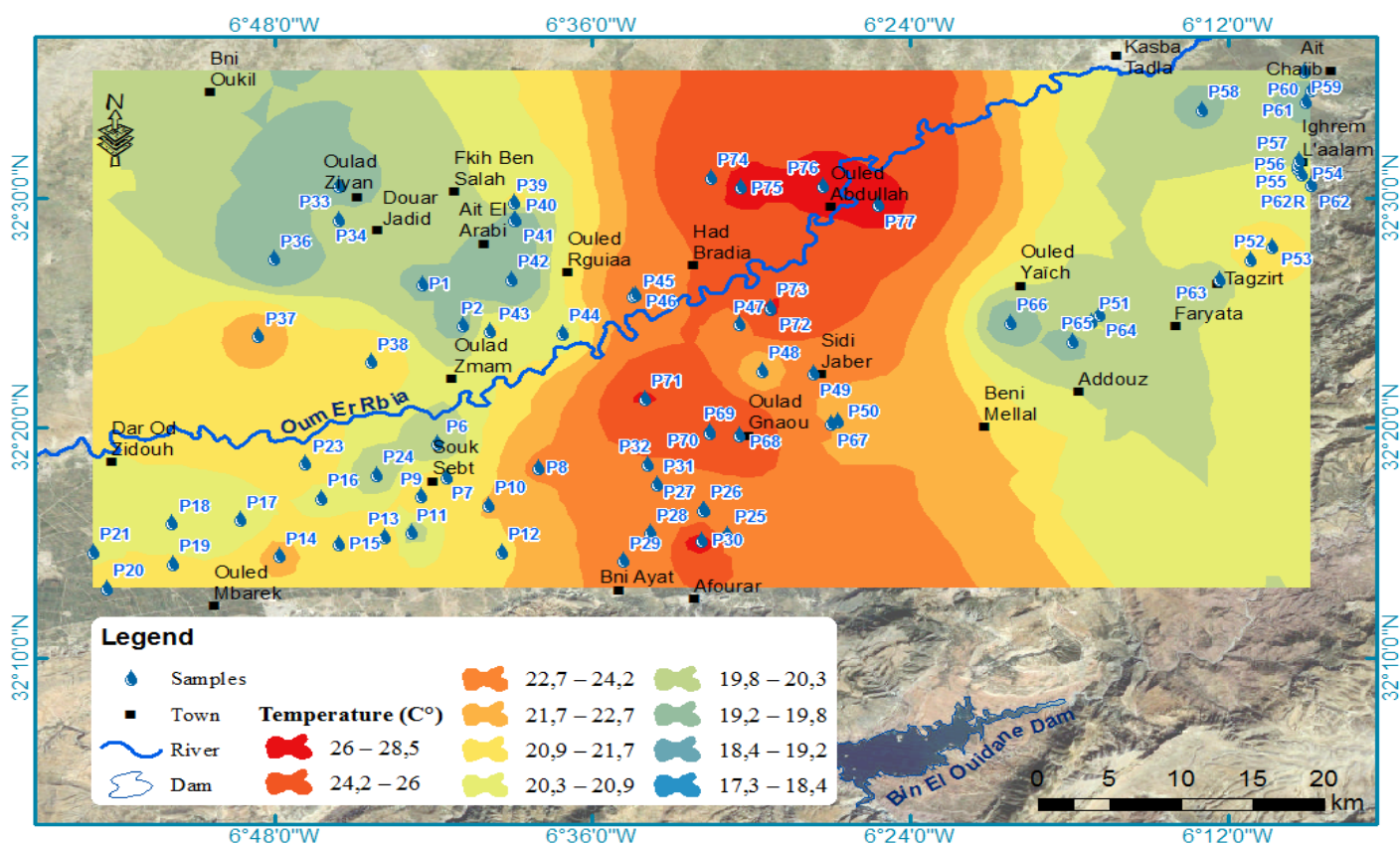


Figure 22: Variation spatiale de la température des eaux souterraines de la plaine de Tadla

Les résultats de la figure 22 montrent que la température de l'eau souterraine dans l'aquifère de Tadla varie entre 17,1 °C et 28 °C, avec une moyenne de 21,27°C.

En effet, la variation de la température des eaux souterraines de la zone d'étude a montré une valeur maximale aux environs de 28,5 °C notamment au niveau de puits P30, situé dans les bény Moussa et installés près des agglomérations humaines, donc près de fausses septiques sujettes aux diverses pollutions. Tandis que les valeurs minimale, au environ de 17°C, ont été enregistrées dans les puits P3, et P37 situés dans les bény Amir.

Les faibles variations de température peuvent résulter notamment d'un ensemble de facteurs tels que : de la profondeur des puits, la nature pédologique de la zone, les conditions climatiques, des cultures pratiquées et par conséquent des pratiques culturales ainsi que du taux de renouvellement du puits.

1.2. Le pH

La mesure du potentiel d'Hydrogène des eaux donne une indication sur son alcalinité et son acidité, il est calculé par la teneur en acide carbonique libre [187]. Il est important pour l'accroissement des micro-organismes qui préfère un pH optimal qui varie de 6,5 à 7,5.

Des valeurs de pH inférieures à 5 ou supérieures à 8,5 affectent directement la croissance et la viabilité des micro-organismes ([188] ;[185]).Donc le pH est l'un des paramètres les plus importants de la qualité de l'eau, et il doit être étroitement contrôlé au cours de toutes opérations de traitement [189].Le pH peut toutefois être modifié par les activités anthropiques, les variations climatiques ou par les différents processus vitaux édaphiques naturels entre autres : les cycles du carbone, de l'azote...

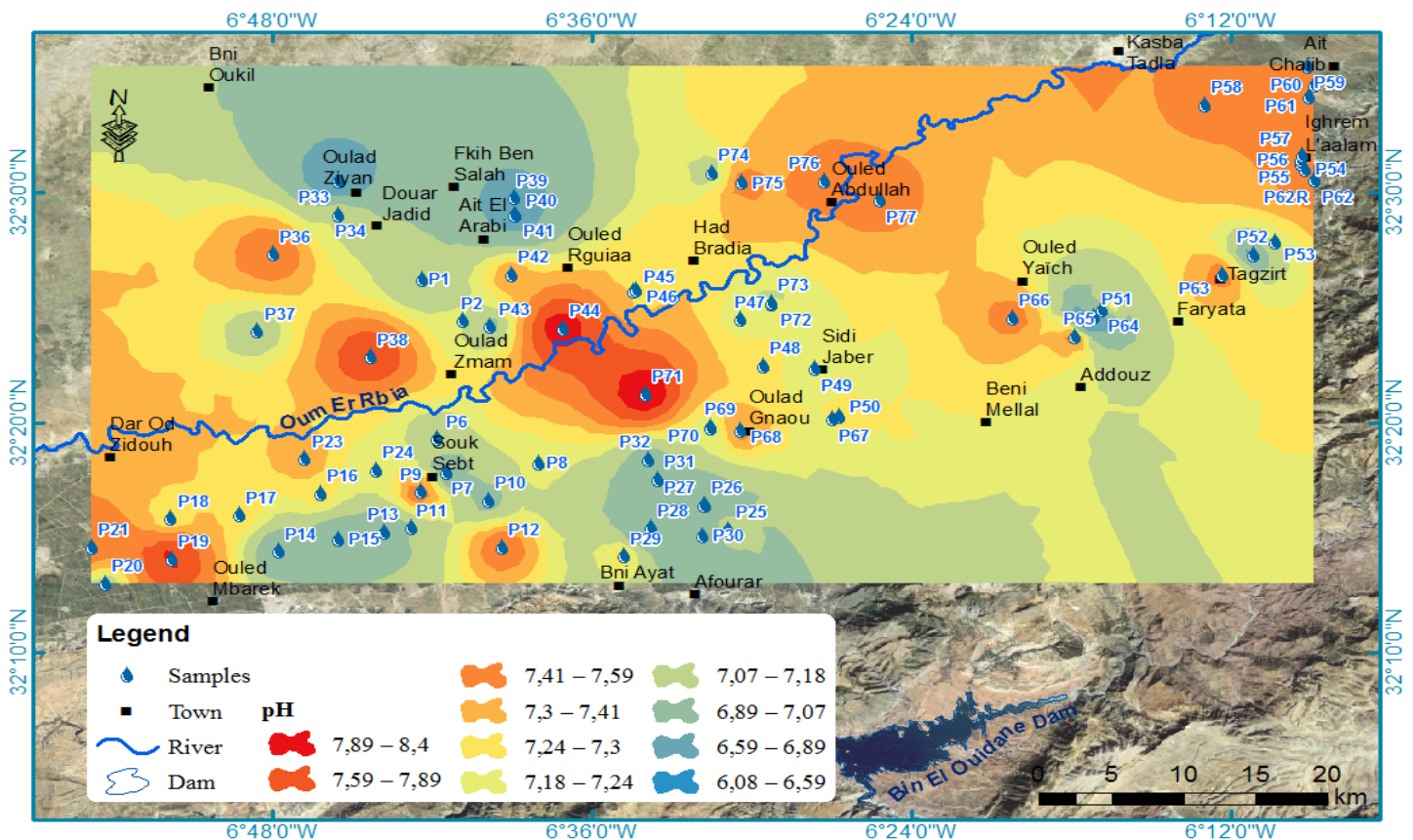


Figure 23: Variation spatiale du pH des eaux souterraines de la plaine de Tadla

La figure 23 montre que le potentiel d'hydrogène, dans la région d'étude durant les campagnes de prélèvement, présente une faible variation entre les différents puits. Les valeurs de pH des échantillons analysés varient entre un minimum de 6,08 enregistré dans le puits P₅₁ et un maximum de 8,4 enregistrée dans le puits P₃₅ situé à beni Moussa avec une moyenne de 7,28.

En somme, ces résultats montrent que le pH est modérément basique à neutre, possiblement en raison de la salinité d'une part et d'autre part de leur proximité de décharges locales ou de celle des eaux usées. Les valeurs de pH n'ont pas de rapport avec les principaux emplois du sol mais uniquement déterminées par la structure des eaux souterraines. Il faut dire

niveau de certains puits qui sont situés à proximité de l'Oum Er-Rbia et près des lagunes des eaux usées.

I.4. Conductivité électrique

La conductivité électrique, constitue un indicateur du degré de la minéralisation globale des eaux et informe sur la salinité. Elle est détectée par la teneur en ions libres. Elle dépend de la concentration, de la température, et de types d'ions présents [193]. Les modifications de la conductivité peuvent être dues aux activités anthropiques par les lixiviats domestiques et/ou agricoles conduisant ainsi à la pollution de l'eau souterraine ou à une cause naturelle.

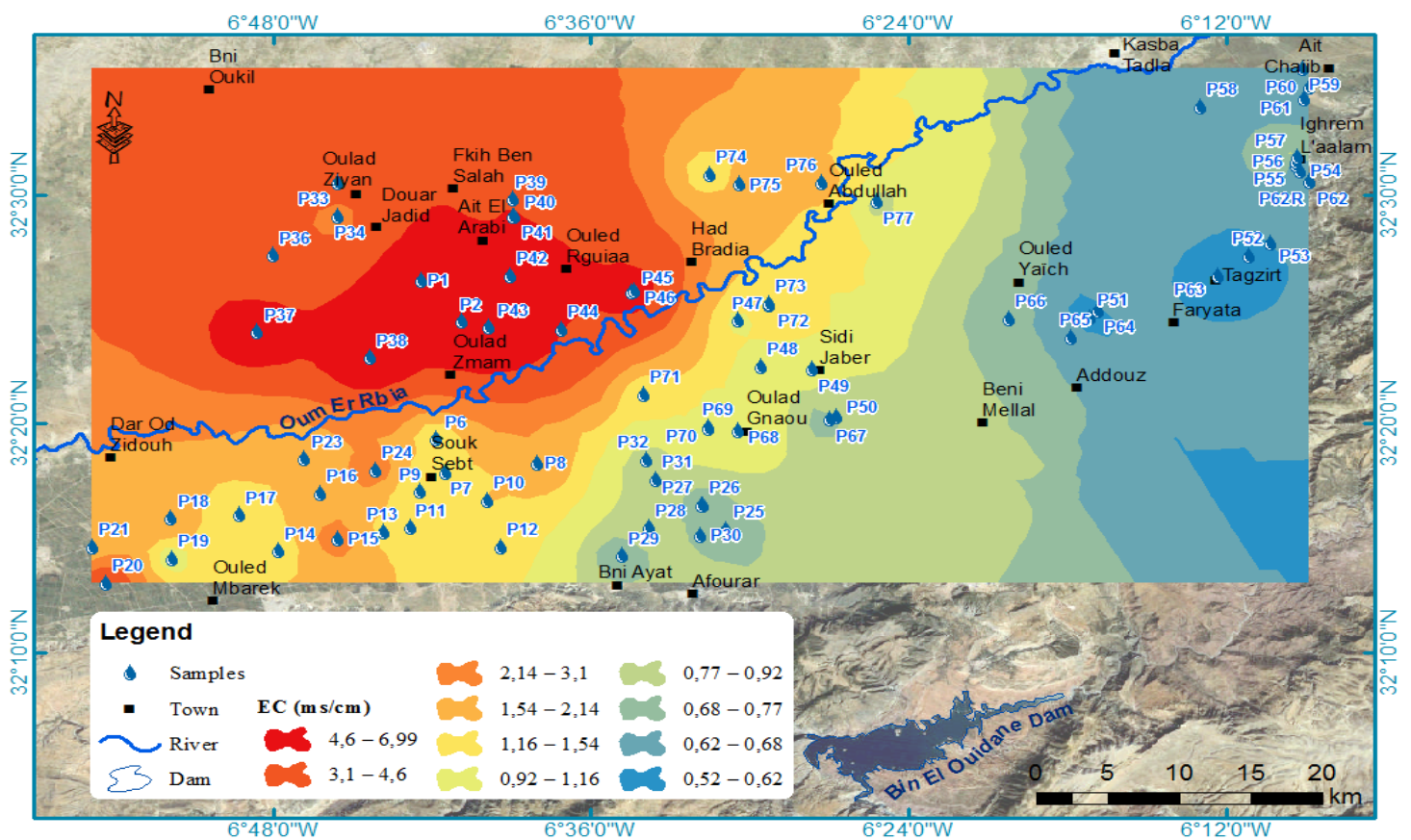


Figure 25 : Variation spatiale de la conductivité électrique des eaux souterraines de la plaine de Tadla

Les valeurs de la conductivité électrique des échantillons des eaux souterraines varient entre un minimum de 400 $\mu\text{s}/\text{cm}$ enregistré dans le puits P₅ situé dans les béni Amir, et un maximum de 6990 $\mu\text{s}/\text{cm}$ enregistré dans le puits P₄₃ situé dans les béni Amir aussi, avec une moyenne de 1848 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

Selon les normes de qualité des eaux (tableau 5), 7% des échantillons sont de bonne qualité, tandis que la majorité des eaux souterraines de la zone d'étude, retenues pour l'analyse,

appartiennent à la classe des eaux de qualité moyenne (56%) à très mauvaise (18%) et par conséquent, la catégorie des eaux sont en général salines à modérément salines[194].

Ces résultats informent sur le recours provisoire à l'eau des puits en période estivale par certains agriculteurs, lors de la non disponibilité de l'eau du barrage pour assurer un brassage des eaux salines et répondre par suite aux exigences des cultures, surtout les agrumes, très exigeantes en eau. Pourtant, l'usage exagéré des eaux salines, en l'absence d'analyse de l'eau et du sol, peut conduire à une éventuelle salinité des sols.

D'une part l'augmentation de la conductivité serait strictement liée à la diminution du niveau piézométrique des puits et d'autre part à l'utilisation excessive des intrants agricoles, notamment, les fertilisants, les pesticides, et certains fongicides qui sont très riches en métaux. Il est à souligner que certains puits ont vu leurs conductivité augmentée ou abaissée fortement, ce fait peut être due à la forte exploitation du terrain, surtout par les locataires (notamment les cucurbitacées d'été, la pomme de terre de saison, les agrumes et la betterave à sucre grands consommateurs d'intrants agricoles), et alors l'usage immense des polluants de diverses nature, soit que le terrain n'est pas exploité (jachère) et par la suite une diminution de la conductivité (P₅, P₅₀, P₅₁, P₅₄, et P₆₂), soit encore que la terre est surexploitée et par conséquent un accroissement de la pollution, alors la conductivité montre une augmentation sévère au niveau des puits: P₁, P₂, P₂₀, P₃₃, P₃₇, P₃₈, P₄₃, P₄₅ et P₄₆.

On remarque que la majorité des puits présentent des valeurs de conductivité électrique qui dépassent la norme marocaine qui est de l'ordre de 2700 $\mu\text{s}/\text{cm}$ [195], et celle de l'OMS (2006)[196] qui est de l'ordre de 1000 $\mu\text{s}/\text{cm}$. EL HAMMOUMI et al (2012)[197] ont montré des valeurs élevées de conductivité électrique dans la même zone variant entre 730 et 10800 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

I.5. Oxygène dissous

La concentration d'une eau en oxygène dissous est fonction de certains facteurs, à savoir ; la pression atmosphérique, la température et la salinité [198], orde l'intensité de l'activité photosynthétique. L'oxygène dissous provient soit de la photosynthèse des organismes autotrophes, essentiellement les algues, soit de l'atmosphère par diffusion. Il est consommé lors de la respiration des végétaux et animaux présents dans l'eau, de la décomposition des matières organiques par les micro-organismes aérobies et de l'oxydation de certaines substances chimiques [185].

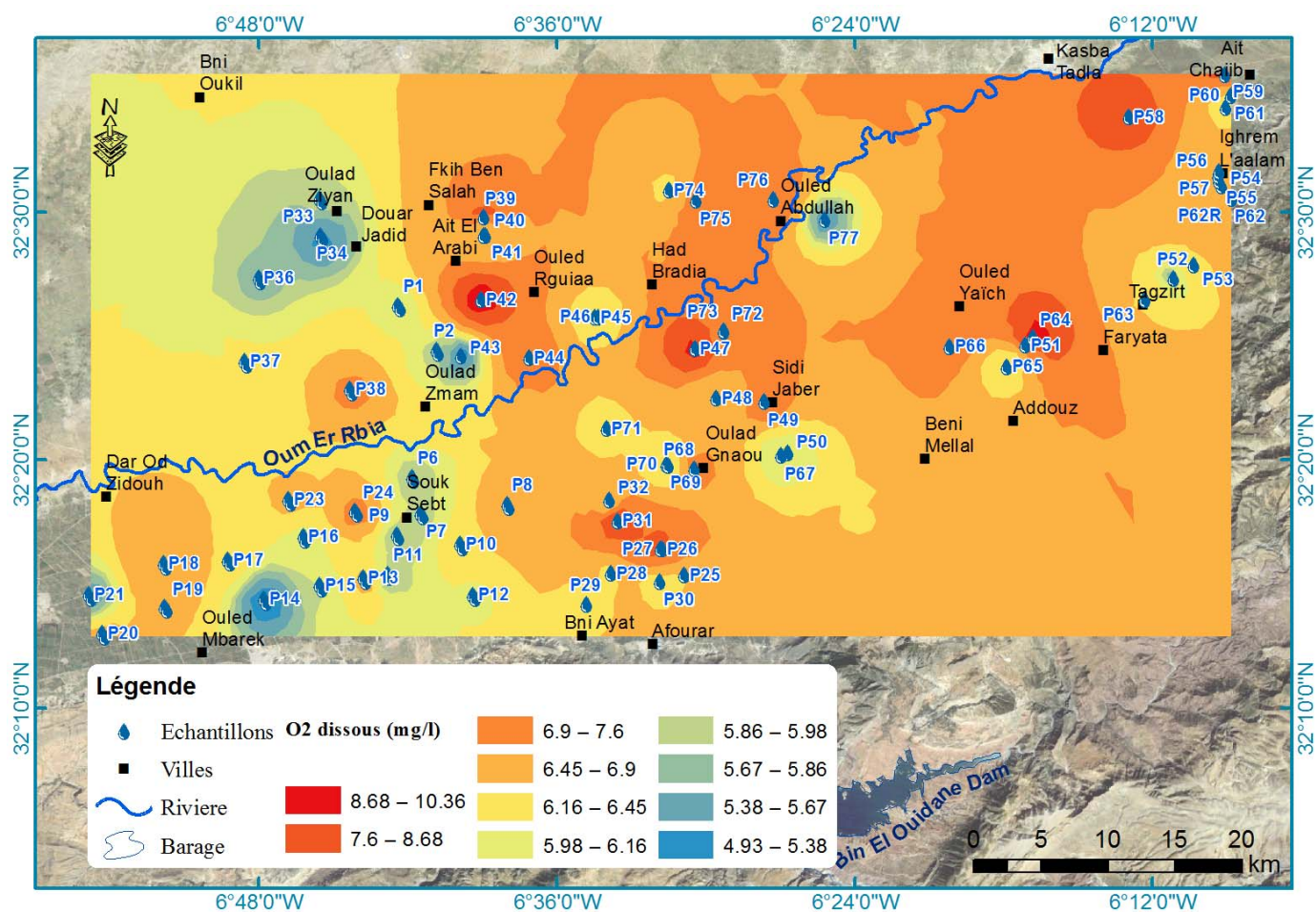


Figure 26: Variation spatiale de l'Oxygène dissous des eaux souterraines de la plaine de Tadla

D'après la figure 26 ci-dessous, les valeurs de la teneur en oxygène dissous des échantillons des eaux souterraines varient entre un minimum de 4,93 mg/l enregistré dans le puits P₁₄ situé dans les bni Moussa, et un maximum de 10,36 mg/l enregistré dans le puits P₆₄ situé dans les bni Amir, avec une moyenne de 6,62 mg/l.

Selon les normes de qualité (O₂ dissous >4 mgd'O₂/l), les échantillons sont de bonne qualité.

I.6. La Demande Chimique en Oxygène (DCO)

Les valeurs de la demande chimique en oxygène des eaux étudiées, varient entre un minimum de 115,2 mg/l et un maximum de 595,2 mg/l, ces valeurs sont enregistrées successivement dans les puits P₁ et P₄₄ situés dans les bni Amir, avec une moyenne de 280,59 mg/l. Nous observons que les valeurs sont généralement élevées.

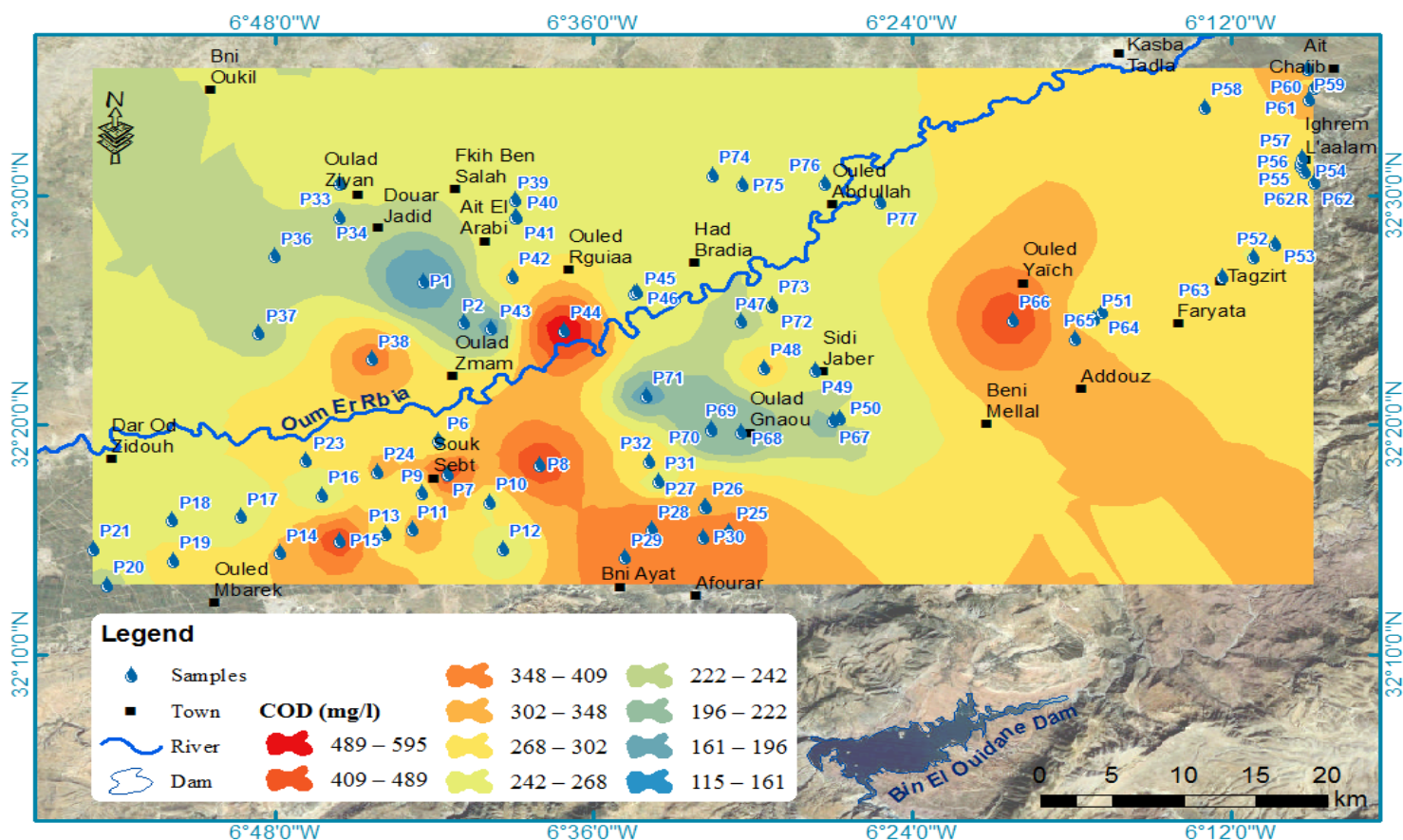


Figure 27: Variation spatiale de la DCO des eaux souterraines de la plaine de Tadla

La détermination de la DCO, permet d'estimer la teneur en matière organique et minérale dans l'eau. Les eaux d'égouts, les eaux industrielles, les eaux polluées, et les eaux résiduelles, consomment de l'oxygène par les actions réductrices sans interventions des micro-organismes [225].

Les résultats de la demande chimique en oxygène des eaux étudiées, sont élevés. Cela pourrait s'expliquer par une charge polluante élevée, tout en sachant que la période de prélèvement correspond au début de la période sèche qui pourrait entraîner un phénomène de concentration. La norme est imprécise ici, cependant une eau dont la DCO est inférieure à 200 mg d'O₂/L est dite de qualité excellente, nos échantillons sont donc variables de qualité excellente à mauvaise qualité.

I.7. Demande biochimique en oxygène (DBO5)

La DBO5 est définie par la quantité d'oxygène consommée par les microorganismes pour assurer la dégradation de la matière organique par voie biologique, elle est calculée à partir de la matière organique et de la DCO suivant cette relation : $MO = (2DBO5+DCO)/3$.

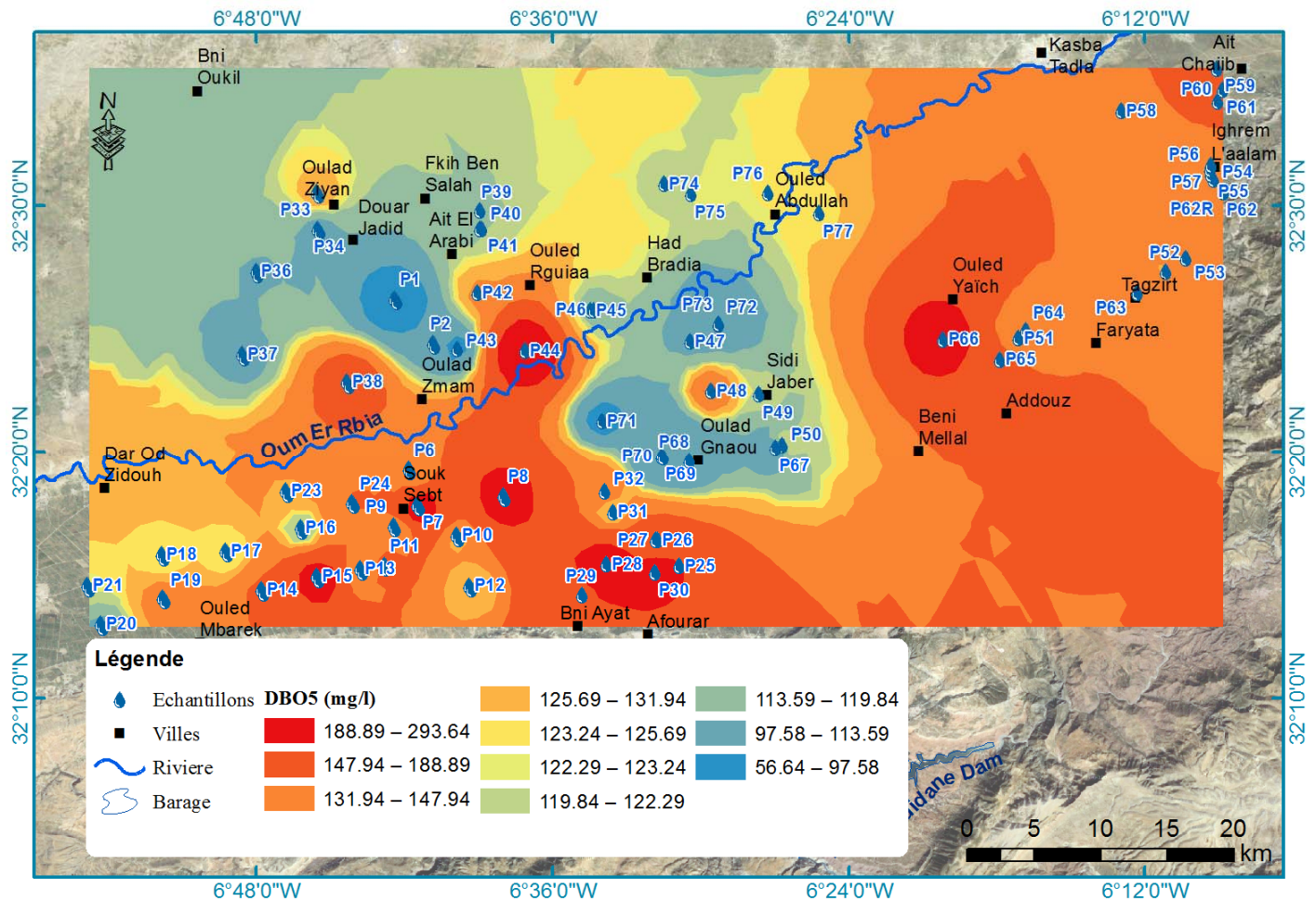


Figure 28: Variation spatiale de la DBO5 des eaux souterraines de la plaine de Tadla

Les valeurs de la demande biologique en oxygène des eaux étudiées, varient entre un minimum de 56,64 mg/l et un maximum de 293,64 mg/l, ces valeurs sont enregistrées successivement dans les puits P1 et P44 situés dans les bni Amir, avec une moyenne de 137,86 mg/l. Nous observons que les valeurs sont généralement élevées, ceci est principalement dû à des facteurs abiotiques tels que l'augmentation de la température et de l'ensoleillement, et par la suite une prolifération des algues.

I.8. Matières Organiques (MO)

Les matières organiques ont longtemps été les principaux polluants des milieux aquatiques. Leurs origines sont multiples : déchets domestiques (ordures ménagères,

excréments), agricoles (lisiers) ou industriels (papeterie, tanneries, abattoirs, laiteries, huileries, sucreries...), lorsque ceux-ci sont rejetés sans traitement primitif.

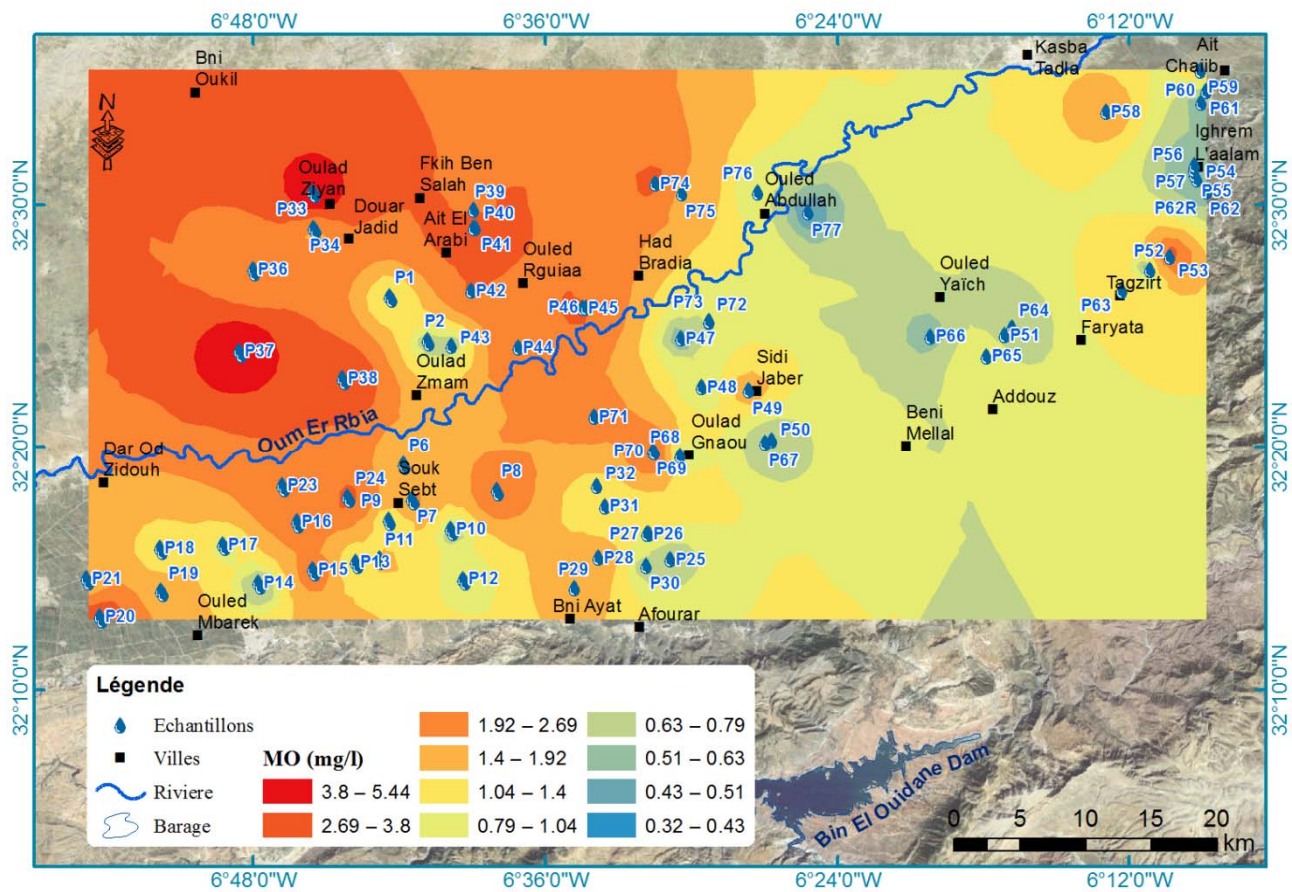


Figure 29: Variation spatiale de la MO des eaux souterraines de la plaine de Tadla

Les valeurs de la matière organique des eaux étudiées, varient entre un minimum de 0,32 mg/l et un maximum de 5,44 mg/l, ces valeurs sont enregistrées successivement dans les puits P57 et P37 situés dans les bni Amir, avec une moyenne de 1,62 mg/l. Les valeurs élevées peuvent être dues à l'agriculture intensive, qui participe à l'accroissement des transferts de matières organiques des sols vers les eaux à travers l'apport d'amendements organiques.

I.9. Nitrate NO_3^-

Puisque les nitrates sont très solubles et mobiles dans la solution du sol, ils sont alors lixiviés facilement vers les eaux souterraines, et constituent ainsi une source potentielle de pollution de la nappe phréatique [127].

En zone agricole, la contamination nitrique peut être due à plusieurs causes: les effets des aménagements hydro-agricoles, le non pratique de cultures intercalaires [199], et le non raisonnement des apports azotés [200].

Les nitrates sont présents dans l'eau par décomposition des matières organiques ou des engrais naturels ou de synthèse, et par lessivage des produits azotés dans le sol. La dégradation de la qualité des eaux en termes de pollution nitrique constitue une menace sérieuse, pour la durabilité du système d'exploitation des terres, aussi sur la santé humaine[201]. Selon l'analyse de la teneur en nitrates (NO_3^-) des divers prélèvements effectués, les résultats obtenus nous ont permis de classer les puits selon les normes recommandées par l'OMS.

Dans l'aquifère de Tadla, les concentrations des nitrates de l'eau souterraine ont des valeurs qui varient entre 24,46 mg/l et 140,82 mg/l avec une moyenne de 58,64 mg/l. Les résultats indiquent des valeurs montrant que l'eau souterraine est alors impropre à la consommation humaine car la limite conseillée par l'OMS est 50 mg/l, et aux apports des nitrates recommandés aux cultures (selon type d'usage, leur fréquence, nature des sols...). Les résultats des analyses ont permis ainsi de limiter les diverses zones de concentrations en nitrates (Fig. ci-dessous). Un gradient net croissant de nitrates s'observe couramment en allant vers les zones à agricole où il y a une forte utilisation d'engrais azotés et aussi à faible profondeur des puits. La teneur la plus élevée est celle qui a été remarquée dans l'eau du puits P50 situé à Béni Amir.

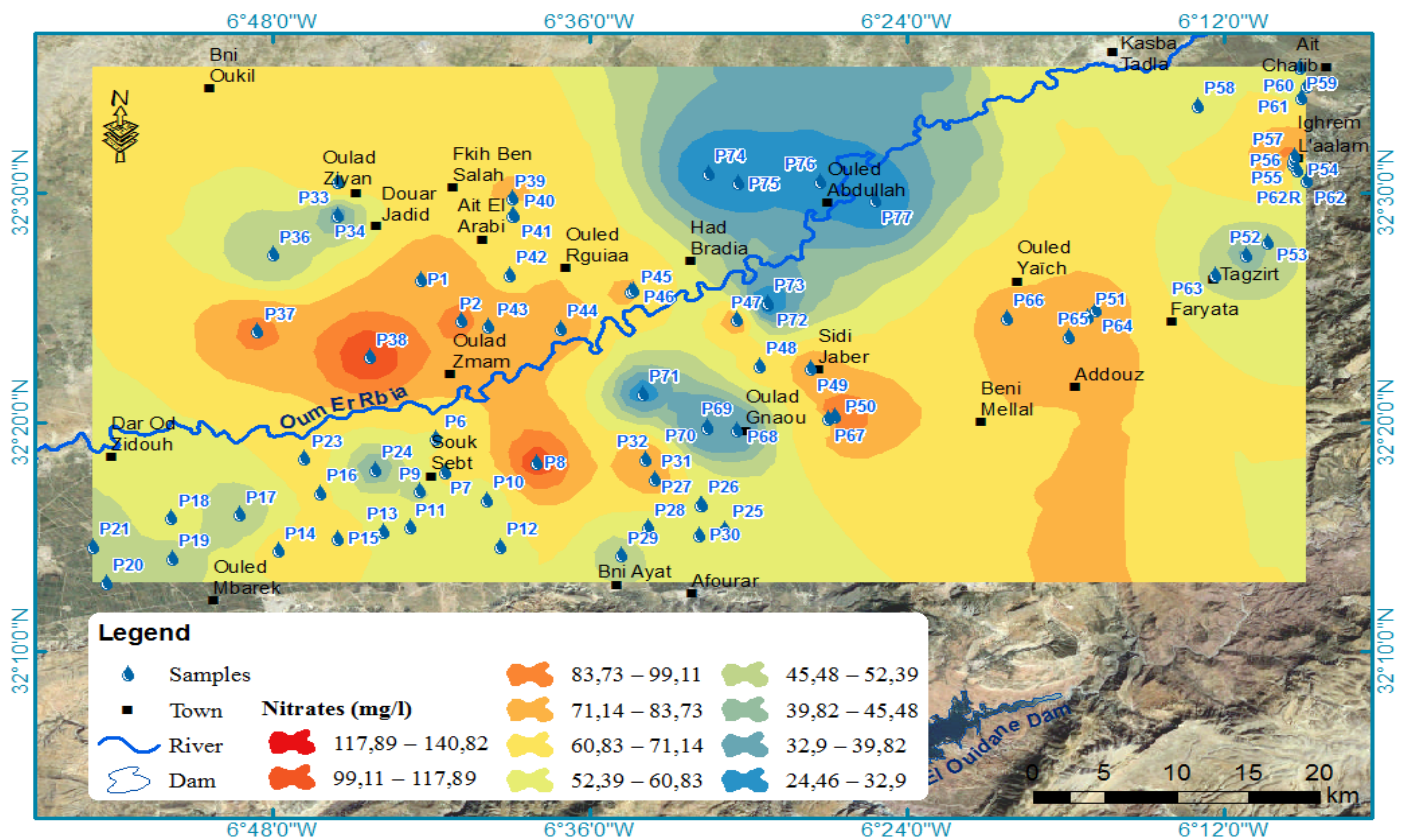


Figure 30: Variation spatiale des nitrates des eaux souterraines de la plaine de Tadla

La grande variabilité spatiale enregistrée dans la plaine de Tadla, est expliquée en majeure partie par la distinction des différents éléments du milieu physique de la région, et par la diversité des contaminants qui sont attachés aux activités agricoles. En analysant la figure 39, on remarque que la plupart des puits étudiés montrent des teneurs en nitrates supérieures aux seuils de qualité proposés qui sont de 50 mg NO₃⁻/l, selon l’OMS (2006) [196] et la norme Marocaine N.M 03.7.001 [195] à 50 mg/l, cette situation alarmante de l’aquifère n’arrête de s’aggraver en l’absence de mesures préventives.

Dans les eaux souterraines, les concentrations en nitrates suivent un régime saisonnier, en général elles augmentent d’une façon sérieuse les étés et diminuent en saison humide. Les teneurs élevées de nitrates sont notamment localisées dans le Sud-Ouest des Béni Amir, avec des concentrations supérieures à 80 mg/l. La superposition de la carte du niveau statique à celle de contamination par les nitrates montre que la contamination par les nitrates se localise surtout dans les localités de faibles profondeurs d'eau, ces zones sont aussi caractérisées par la pratique intensive du betterave, agrumes et maraîchage, d’où une utilisation énorme de nitrates d’origine organique et/ou minérale (notamment l’ammonitrate qui est facilement lessivables), cet aspect a été signalé aussi par Berdai et *al.*, (2004)[108], Aghzar et *al* (2002)[8], et Faouzi et Larabi (2010) [169], ils ont trouvé que les nitrates dans la plaine de Tadla varient entre 15 et plus de 100 mg/l.

Les apports excessifs de fertilisants azotés, du fumier, l’intensification agricole (notamment des agrumes qui sont plus exigeants en engrais que les autres cultures), les faibles profondeurs de la nappe que connaissent des zones de la plaine, les précipitations et à l’irrigation abondante (qui favorise ainsi la minéralisation de la matière organique et accroît l’azote potentiellement lixiviable par le drainage des éléments minéraux, et véhicule des quantités considérables d’azote vers la nappe phréatique), sont les causes possibles de la pollution des eaux souterraines par les nitrates. Ce phénomène a été soulevé par divers chercheurs dans différentes zones à activité agricole intense ([202]; [203]; [204]; [205]; [206]; [207]).

En général, le déplacement des ions nitrates vers les eaux souterraines dépend des facteurs suivants qui apparaissent déterminants dans la contamination de la nappe par les nitrates : la nature du sol, la profondeur et le niveau de la nappe, l’apport non raisonné en éléments fertilisants azotés, la nature lithologique et la perméabilité de l’aquifère exploité, tandis que les précipitations qui lorsqu’elles sont ordinaires constituent un apport bénéfique pour la nappe et tendent à diluer la pollution nitratée.

I.10. Nitrites NO_2^-

Les nitrites (NO_2^-) représentent une forme moins oxygénée et moins stable de l'azote et par conséquent, très peu présents dans les eaux souterraines sauf en cas d'une pollution de surface. Ils constituent un passage entre les nitrates et l'ammonium et elles ont une forme toxique. Lors du rejet d'azote organique (acides aminés, protéines, urée...), les molécules sont tout d'abord transformées en ammonium (NH_4^+), qui est ensuite oxydé en nitrites puis en nitrates sous l'action de bactéries nitrifiantes. Ces processus d'oxydation, également appelés « nitrification ». Un excès de nitrites dans les eaux de boisson peut provoquer l'hypotension chez les humains et une méthémoglobinémie chez les nourrissons [2].

Les nitrites sont ainsi de bons indicateurs de contamination bactériologique et organique [208].

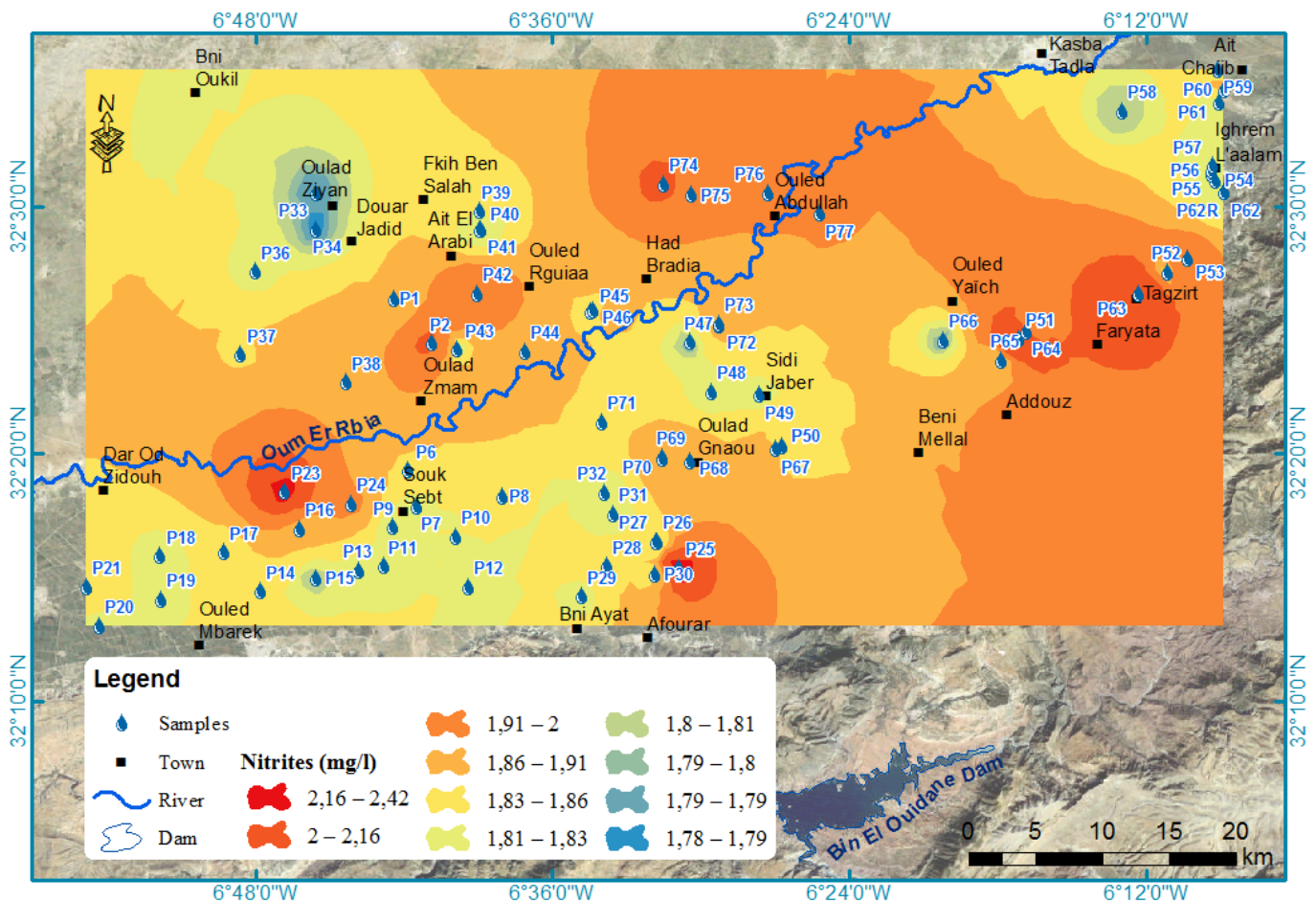


Figure 31: Variation spatiale des nitrites des eaux souterraines de la plaine de Tadla

D'après la figure 31, Les résultats des concentrations en nitrites des eaux étudiées, dépassent les normes marocaines (0,5 mg/l), les valeurs notées varient entre un minimum de 1,78 mg/l et un maximum de 2,42 mg/l situés respectivement dans les puits P30 et P50 dans les

Béni Moussa. Cela serait dû à l'oxydation incomplète de l'ammonium, soit par une réduction des nitrates (qui sont d'origine agricole), sous l'influence des bactéries dénitrifiantes, ou à l'épandage de fumier ou d'engrais chimiques, ou par les installations septiques avoisinantes. Ce résultat confirme celui obtenu par Hammani et *all* en 2006[226].

I.11. Azote ammoniacal NH_4^+

L'ammoniaque est l'un des maillons du cycle de l'azote, c'est un gaz soluble dans l'eau, contrairement aux nitrates et nitrites qui sont solubles et ruissellent vers les ruisseaux et percolent vers les nappes phréatiques, l'ammonium se fixe aux colloïdes du sol et est par la suite peu néfaste aux eaux souterraines. Il peut provenir d'un grand nombre de sources : industrie chimique (textile, papetière), usage domestique (urée...), industrie agro-alimentaire (les conserveries, abattoirs), et usage agricole (engrais : ammonitrate 33,5% ou 34% et les engrais composés binaires sous forme de mono-ammonium-phosphate (11-55-0) et sulfate d'ammoniaque 21%)[209], l'application des engrais à des doses élevées surtout aux cultures plus consommatrices à savoir : la betterave à sucre, les agrumes et le maraîchage, est grave car le surplus non utilisé par les cultures est lessivé vers les eaux souterraines notamment dans des périodes de forte précipitations.

L'apport d'azote sous les formes ammoniacales limite les pertes par lixiviation, les engrais ammoniacaux sont beaucoup adsorbés sur les argiles du sol, ce qui rend lors leur action plus soutenue et atténuée que celle des nitrates qui, malgré leur action rapide sur les plantes, sont très mobiles et risquent d'être lixiviés en période de forte pluviosité [2]. L'azote ammoniacal présente différents désavantages tel que la corrosion des conduites, la diminution de l'efficacité du traitement de désinfection au chlore et le développement de microorganismes responsables de saveurs et d'odeurs désagréables ([2] ; [112]).

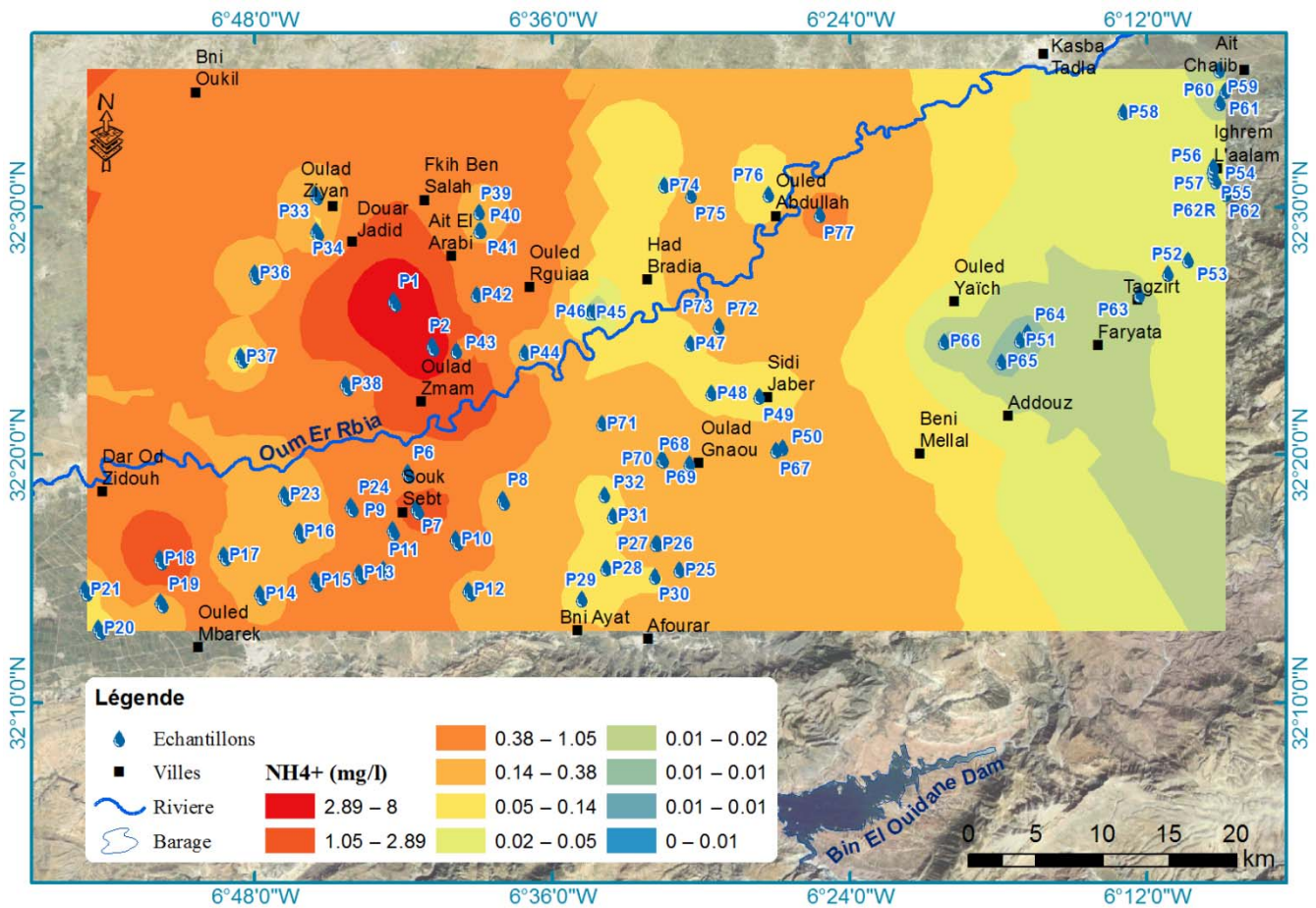


Figure 32: Variation spatiale de l'azote ammoniacal des eaux souterraines de la plaine de Tadla

Les valeurs de l'azote ammoniacal des eaux étudiées, varient entre un minimum de 0,001 mg/l et un maximum de 8 mg /l, ces valeurs sont enregistrées successivement dans les puits P₆ et P₁ situés respectivement dans les bény Moussa et les bény Amir, avec une moyenne de 0,41 mg/l. Néanmoins, les valeurs de l'ammonium ne dépassent pas les normes marocaines N.M qui sont fixées à 0,5 mg/l [195] pour la plupart des points d'eau échantillonnées, (sauf les puits P₁, P₂, P₅, P₇, et P₁₈). Ces faibles teneurs sont expliquées par la fixation d'ammonium dans le sol.

I.12. Sodium Na⁺

Les origines de sodium dans les eaux souterraines sont multiples à savoir, les formations géologiques contenant du chlorure, la décomposition des sels minéraux tels les silicates d'aluminium et de sodium, l'entrée des eaux salées dans les nappes phréatiques (origine marine), et aussi plusieurs usages industriels...

Une fois le sodium est en en solution, aucune réaction ne permet de l'extraire de l'eau souterraine, on dit que c'est un élément conservatif.

Dans les eaux souterraines non polluées et sans contact avec des évaporites, la teneur en sodium se situe entre 1 mg/l et 20 mg/l [210].

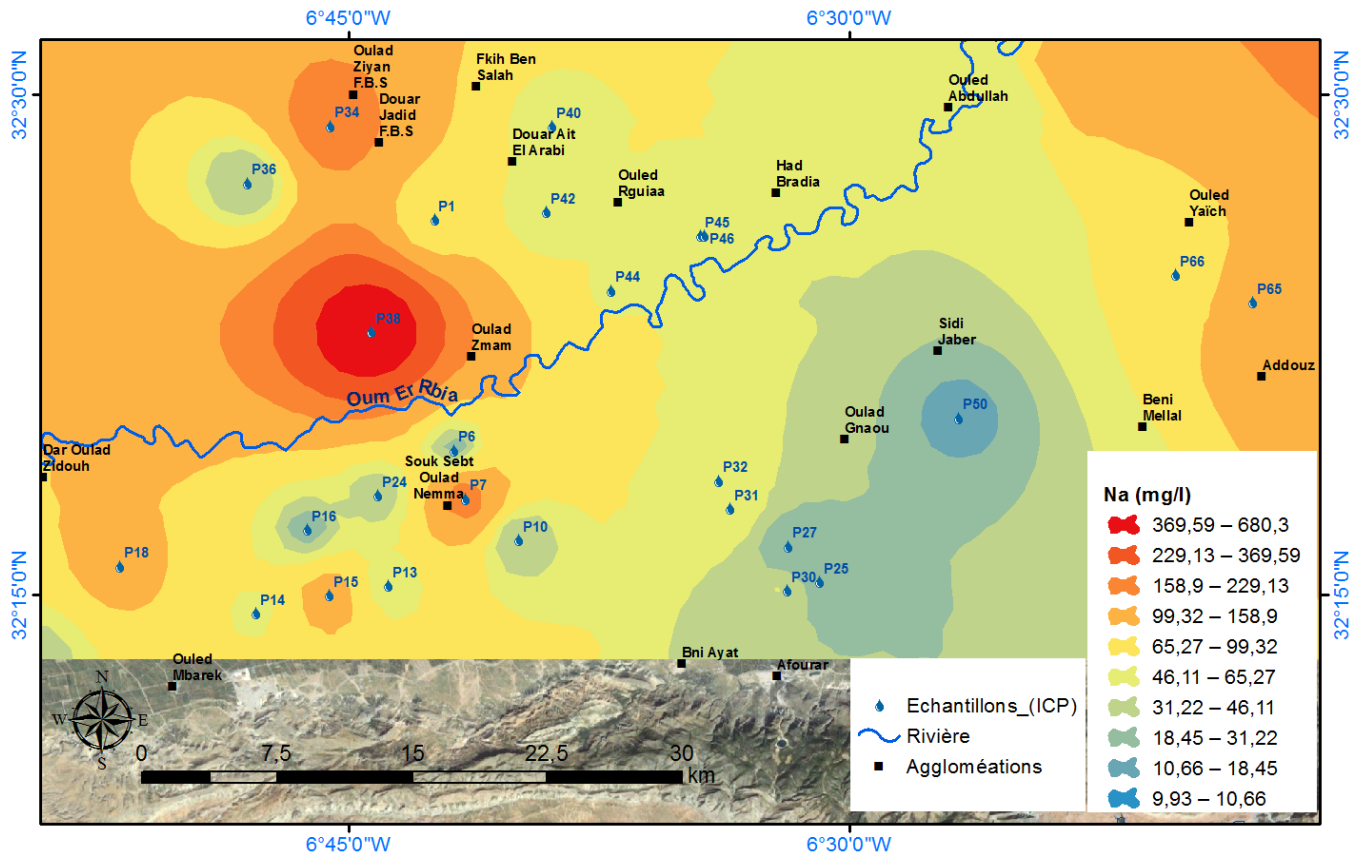


Figure 33: Variation spatiale de sodium des eaux souterraines de la plaine de Tadla

Les analyses des échantillons des eaux des puits ont montré que les teneurs en sodium de presque la totalité des puits (sauf les puits P7, P34, P38, et P54) ne dépassent pas les normes recommandées par l'OMS, fixées à 150 mg/l [196]. Les concentrations en sodium de l'eau souterraine dans la plaine de Tadla varient entre un minimum de 9,93 mg/l et un maximum de 680,3 mg/l avec une moyenne de 102,55 mg/l. Pour les quatre puits qui présentent des valeurs élevées de sodium peuvent être dues à une influence des formations marneuses du pliocène et au l'irrespect des pratiques de lessivage des sels. Le même résultat a été confirmé par EL HAMMOUMI et al (2012)[197] qui ont trouvé que le sodium dans la zone d'étude varie entre un minimum de 7,68 et un maximum de 1152 mg/l.

I.13. Calcium Ca²⁺

Les eaux souterraines sont de nature riches en calcium, ce dernier permet de déterminer la dureté de l'eau et par conséquent les eaux cristallines montrent généralement de faibles concentrations en calcium (<15mg/l), tandis que les eaux carbonatées ont des teneurs naturelles aux environs de 100 mg/l ([209]; [210]; [2]).

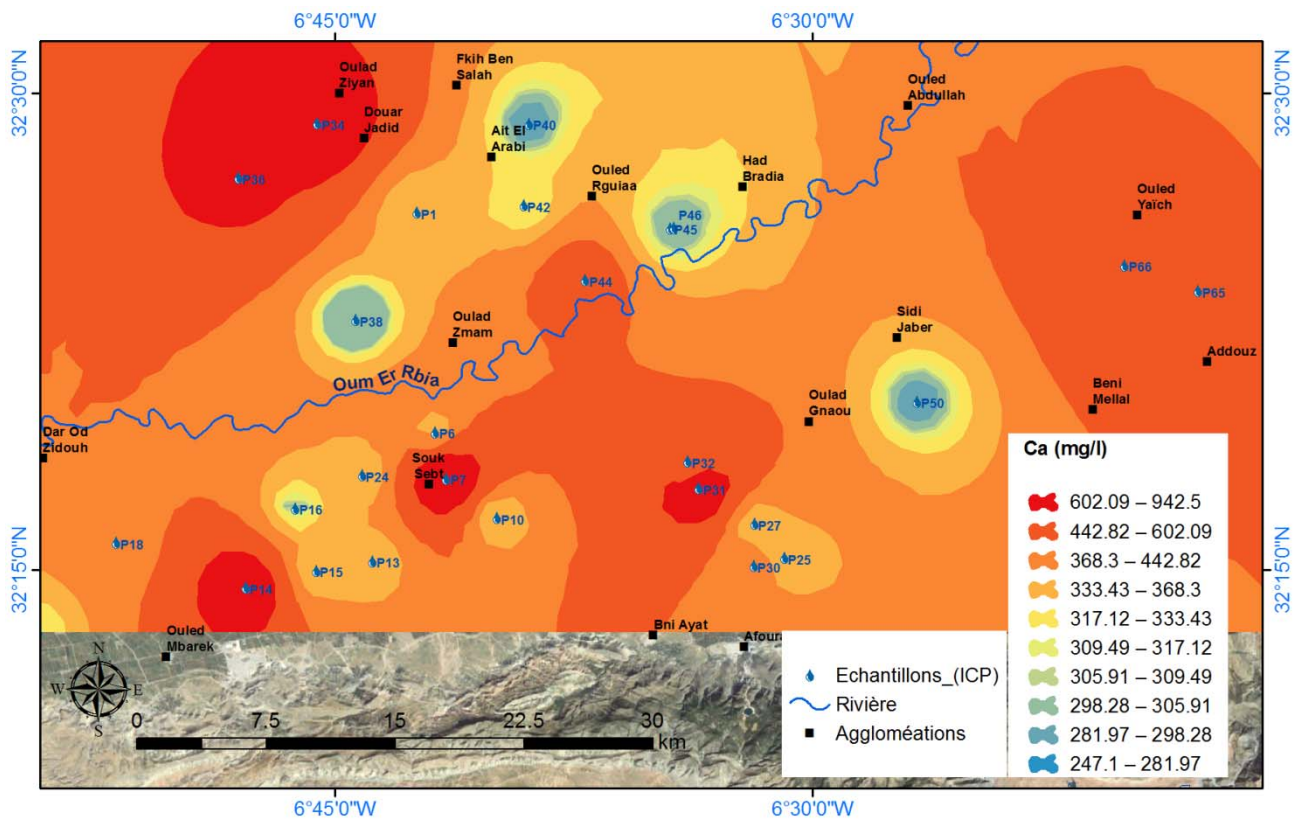


Figure 34: Variation spatiale de calcium des eaux souterraines de la plaine de Tadla

Les valeurs du calcium des eaux étudiées, varient entre un minimum de 247,1 mg/l et un maximum de 942,5 mg/l, ces valeurs sont enregistrées successivement dans les puits P₃₈ et P₇ situés respectivement dans les bény Amir et les bény Moussa, avec une moyenne de 428,42 mg/l. Néanmoins, toutes les valeurs obtenues dépassent la norme de l'OMS 2004 qui est de 150 mg/l. Le même résultat a été confirmé par EL HAMMOUMI et al (2012), [197] qui ont trouvé que le calcium dans la zone d'étude varie entre un minimum de 82,2 mg/l et un maximum de 825 mg/l. Ces teneurs élevées en calcium s'expliquent par la nature géologique du sous-sol, et les diverses activités anthropiques dont l'activité agricole intensive de la région d'étude.

I.14. Magnésium Mg^{2+}

Le magnésium est moins abondant dans la nature, il provient de l'altération et la dissolution des minéraux carbonatés telle la magnésite, la dolomite, et la calcite magnésienne, il est rencontré dans les eaux sous forme de bicarbonates et contribue à la dureté de l'eau.

Les activités anthropiques à savoir, l'activité agricole (amendements et apports d'engrais) et les libérations des eaux usées constituent des éventuelles sources de magnésium.

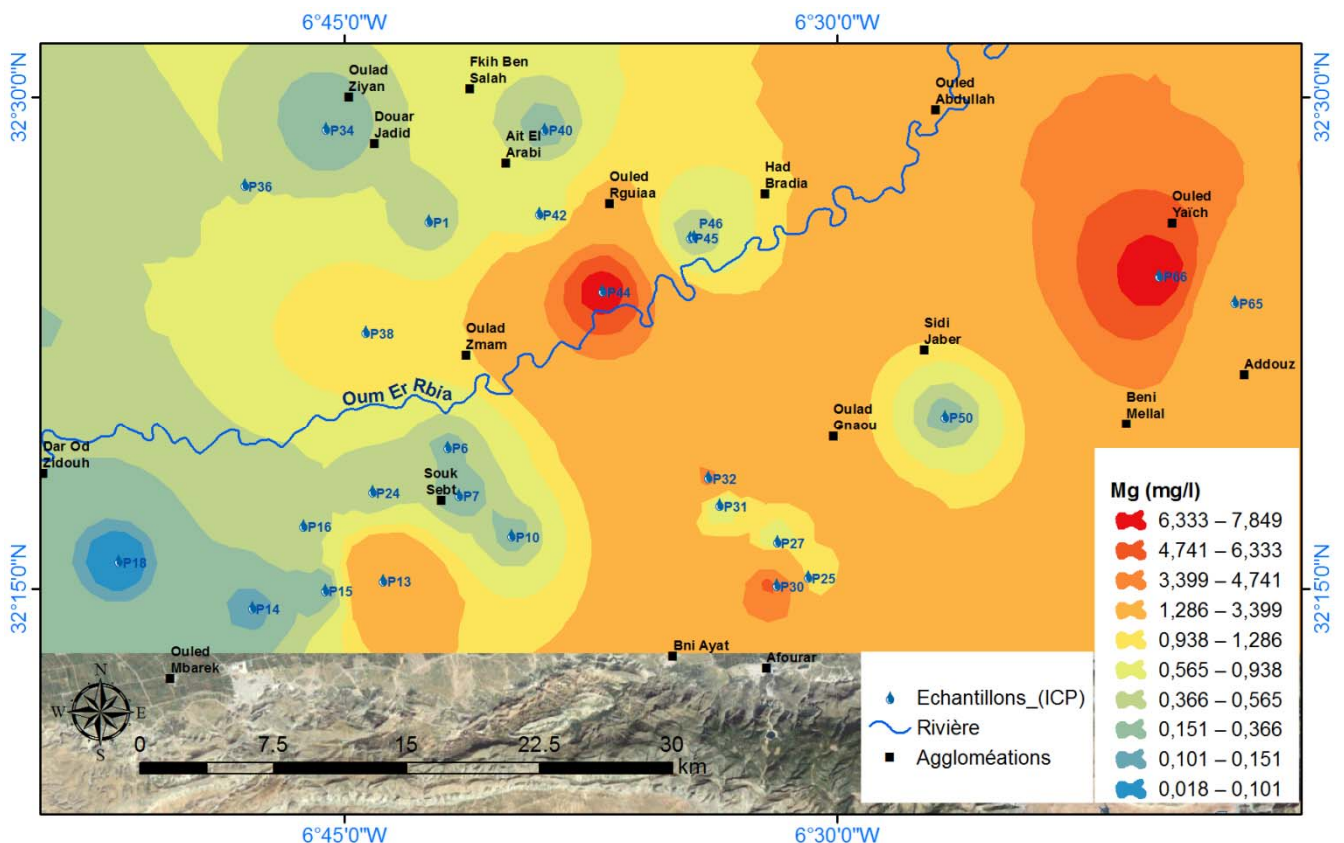


Figure 35: Variation spatiale de magnésium des eaux souterraines de la plaine de Tadla

Les valeurs du magnésium des eaux étudiées, varient entre un minimum de 0,018 mg/l et un maximum de 7,85 mg /l, ces valeurs sont enregistrées successivement dans les puits P18 et P44 situés respectivement dans les bény Moussa et les bény Amir, avec une moyenne de 1,43 mg/l. Ces résultats montrent des valeurs indiquant que l'eau souterraine de la zone d'étude est au-dessus des normes de l'OMS (50 mg/l).

I.15. Résultat du SAR

Comme déjà cité dans la partie bibliographique, Le sodium (Na) est parmi les sels dissous dans l'eau, mais il requiert plus d'attention, car de fortes concentrations en sodium peuvent être néfastes pour la plante en modifiant les conditions physiques du sol [56], on ne parle pas de concentration en sodium dans la littérature, mais plutôt d'une valeur qui tient compte des

effets mutuels du sodium, du calcium et du magnésium. Il s'agit alors du ratio d'adsorption du sodium par le sol, le SAR (Sodium Adsorption Ratio/ rapport d'adsorption du sodium) qui est calculé selon la formule proposée par Gapon puis rapporté par Richard [57].

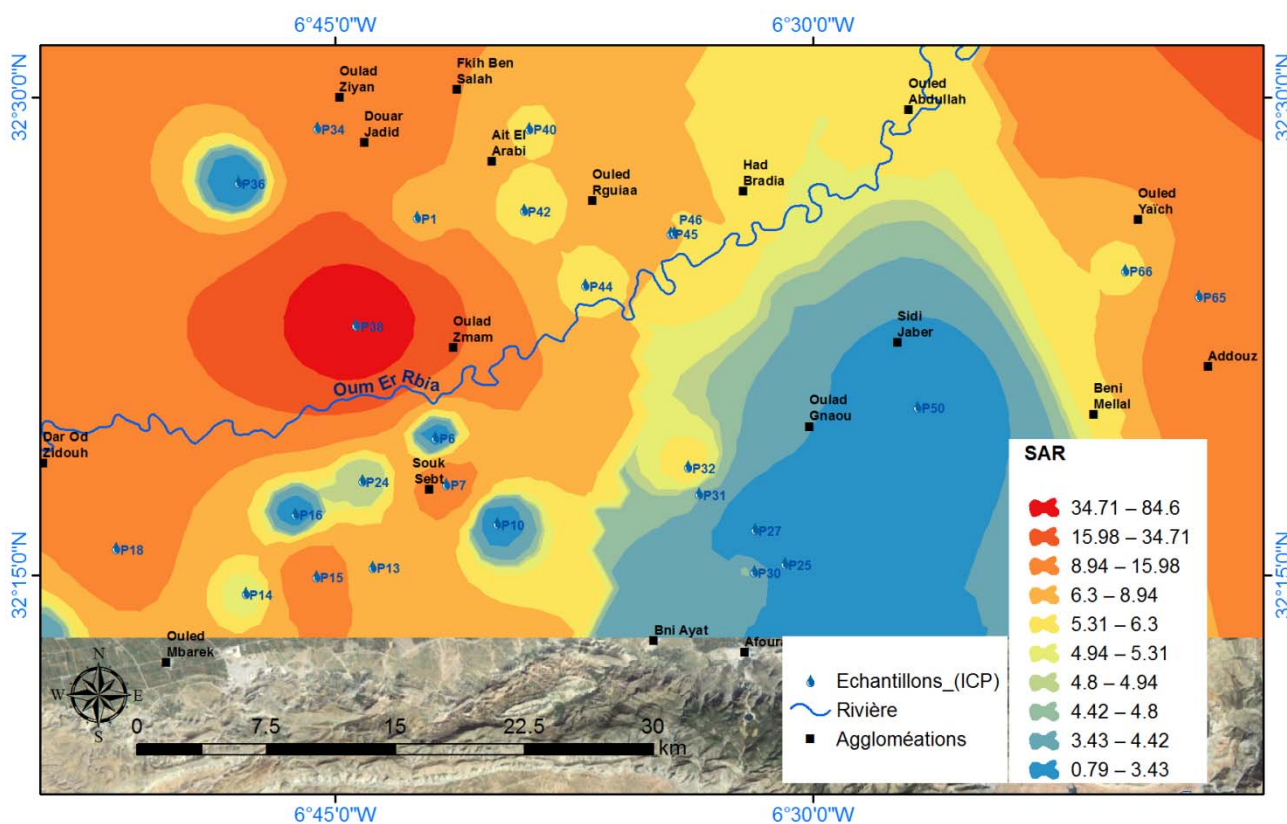


Figure 36: Variation spatiale du SAR des eaux souterraines de la plaine de Tadla

Pour préciser l'aptitude à l'irrigation des eaux de la nappe de la plaine de Tadla, nous utilisons les valeurs de la conductivité électrique et celles du SAR.

Les valeurs du SAR des eaux étudiées, varient entre un minimum de 0,78 et un maximum de 84,7 ; avec une moyenne de 10,94 ; 74% des puits analysés appartient à la classe S1 ($0 < \text{SAR} \leq 10$), où les eaux sont utilisables pour l'irrigation de presque tous les sols, et le danger d'alcalinisation est réduit, bien que certaines cultures sensibles au sodium puissent être gênées, 20% des puits analysés appartient à la classe S2 ($10 < \text{SAR} \leq 18$), où le danger d'alcalinisation des sols est appréciable dans les sols à textures fine et à forte capacité d'échange, surtout dans la condition de faible lessivage, l'eau est utilisable sur les sols de texture grossière, ou sur les sols organiques ayant une bonne perméabilité, et 6% des puits analysés appartient à la classe S4 ($\text{SAR} > 26$), où les eaux souvent inutilisables pour l'irrigation, présentant un fort danger d'alcalinisation, ces eaux sont utilisées pour l'irrigation, seulement si leur salinité permet l'addition de calcium ou si le sol en contient suffisamment.

I.16. Potassium K⁺

Le potassium est trouvé dans plusieurs minerais comme la sylvinite sous forme de chlorures doubles, et dans les cendres des végétaux sous forme de carbonates, il est essentiel à la vie notamment pour les végétaux. Le potassium est fortement utilisé comme engrais de fond en agriculture, sous forme de chlorure de potassium, de sulfate de potassium, ou de nitrate de potassium. Dans les eaux naturelles, la teneur en potassium est quasiment constante et ne dépasse pas 10 à 15 mg/l, ses apports sont d'origines diverses (industrielle, domestiques, et agricoles) [211].

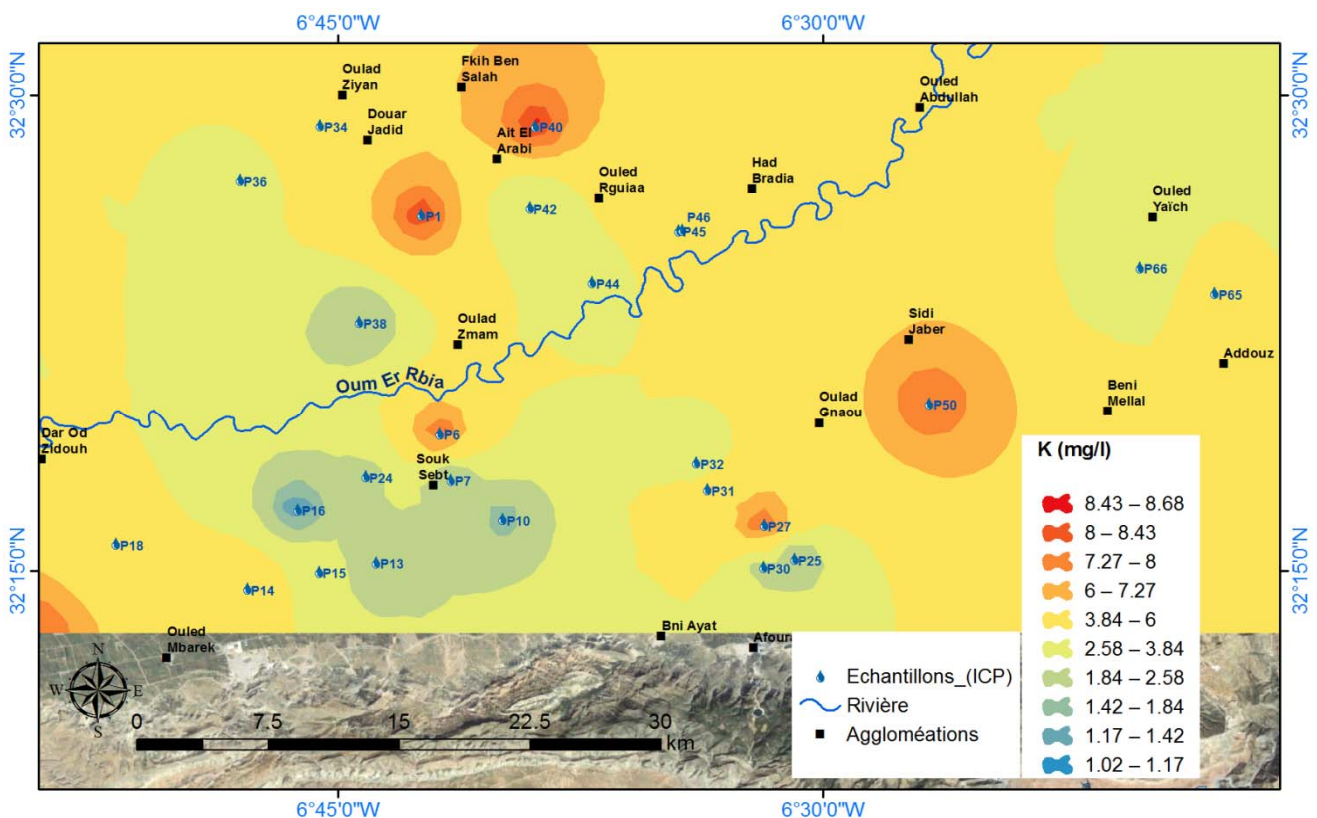


Figure 37: Variation spatiale de potassium (mg/l) des eaux souterraines de la plaine de Tadla

Les concentrations en potassium dans les eaux souterraines de la plaine de Tadla varient entre un minimum de 1,02 mg/l et un maximum de 8,68 mg/l avec une moyenne de 4 mg/l. Ces résultats des puits analysés ne dépassent pas les normes de l’OMS (12 mg/l), le même résultat a été montré par EL HAMMOUMI et al (2012) [197], ils ont trouvé des valeurs variant entre un minimum de 0,609 mg/l et un maximum de 5 mg/l. Malgré la sur utilisation des engrais potassiques dans la zone d’étude (les agrumes et la betterave à sucre), les concentrations en potassium ne sont pas élevées, ce qui est expliqué par le fait que le potassium est affecté simplement par échange d’ion avec le sol et qu’il est absorbé par les argiles [212].

II. Variation des teneurs métalliques (en mg/l) des eaux souterraines de la plaine de Tadla

La pollution métallique est devenue de plus en plus importante, ainsi que les besoins en métaux augmentent, et si les méthodes de production ne sont pas bien contrôlées, elles peuvent avoir des effets néfastes sur l'environnement.

Les métaux provoquent des changements indésirables sur le milieu naturel qui apparaissent en partie ou en totalité comme un sous-produit de l'action humaine, sous des effets directs ou indirects ou par les ressources agricoles... [213].

Les métaux lourds dans l'environnement proviennent de nombreuses sources, soit à partir des phénomènes naturels pédogéniques et géologiques, ou par des phénomènes anthropogéniques.

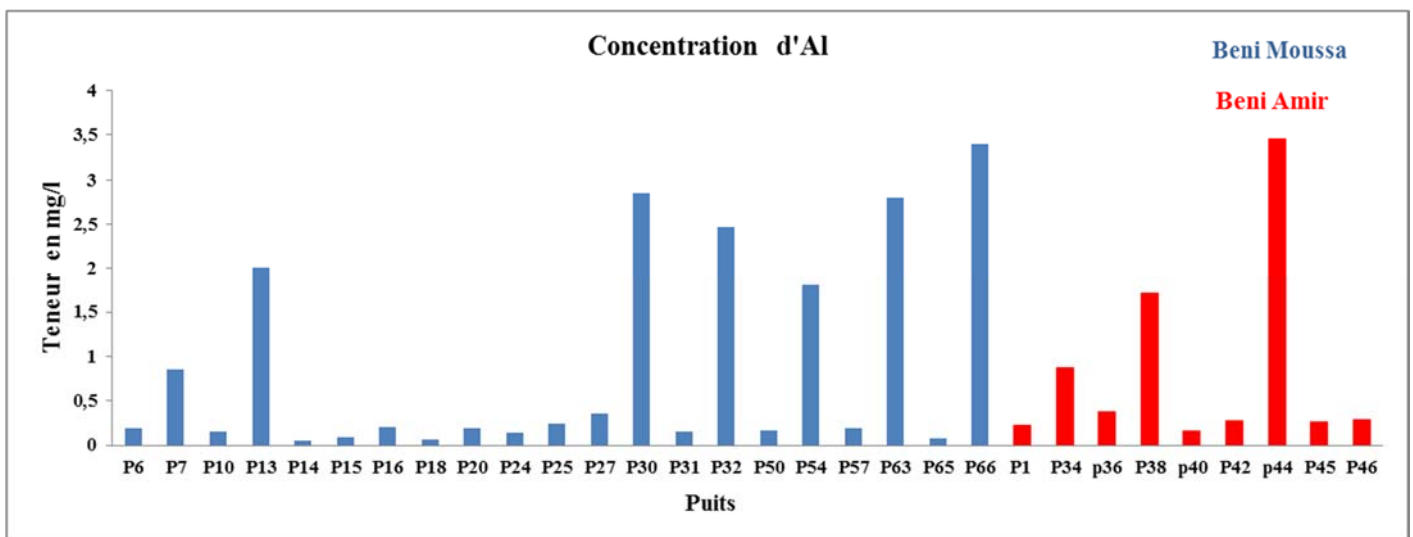


Figure 38: Variation spatiale des teneurs d'Aluminium (en mg/l) des eaux souterraines de la plaine de Tadla

Les valeurs d'Aluminium mesurées dans les eaux échantillonnées, varient entre un minimum de 0,051 et un maximum de 3,45 mg/l, avec une moyenne de 0,86 mg/l, cette teneur en Al dans les échantillons est au-dessous du seuil admissible fixé par l'OMS soit 0,2 mg/l à l'exception des puits P7, P13, P30, P32, P38, P44, P54 P63 et P66. Il est Neurotoxique, et suspecté de jouer un rôle dans la maladie d'Alzheimer.

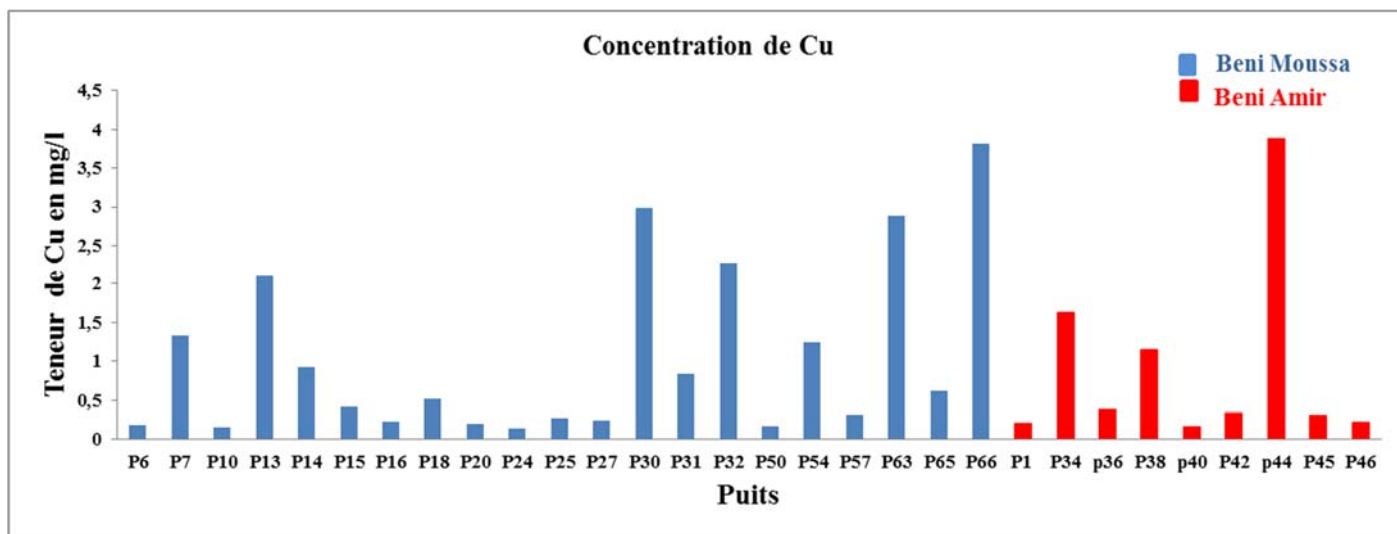


Figure 39: Variation spatiale des teneurs de Cuivre (en mg/l) des eaux souterraines de la plaine de Tadla

Pour le Cuivre, les valeurs mesurées dans les eaux échantillonnées, varient entre un minimum de 0,14 et un maximum de 3,87 mg/l, avec une moyenne de 1,003 mg/l, cette teneur en Cu dans les échantillons est au-dessous du seuil admissible fixé par l’OMS soit 2 mg/l à l’exception des puits P30, P32, P44, P63 et P66. Il cause des irritations des muqueuses respiratoires et oculaires, douleurs épigastriques, céphalées, nausées, étourdissements, vomissements, diarrhée, tachycardie, et une insuffisance rénale.

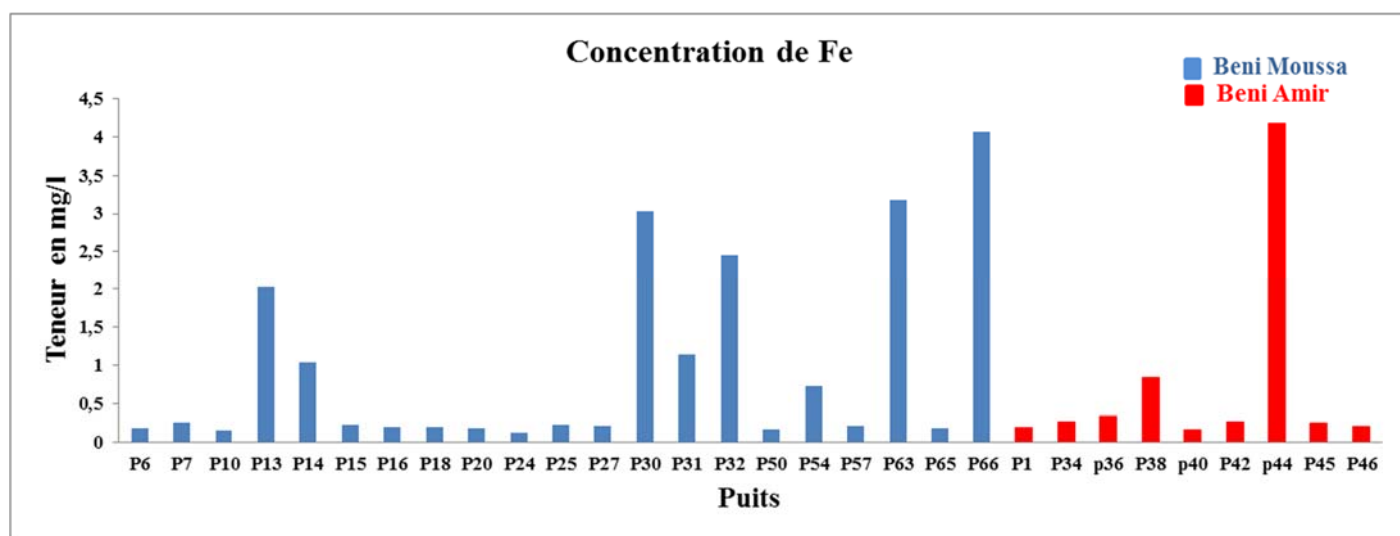


Figure 40: Variation spatiale des teneurs de Fer (en mg/l) des eaux souterraines de la plaine de Tadla

Le Fer mesurés dans les eaux échantillonnées, présente des valeurs variant entre un minimum de 0,12 et un maximum de 4,16 mg/l, avec une moyenne de 0,89 mg/l, cette teneur en Fe dans les échantillons est au-dessous du seuil admissible fixé par l’OMS soit 0,2 mg/l à l’exception des puits P₇, P₃₀, P₃₂, P₃₈, P₄₄, P₅₄P₆₃ et P₆₆. Il cause les troubles cardiovasculaires, une prévalence accrue du syndrome métabolique, du diabète, et de certains cancers.

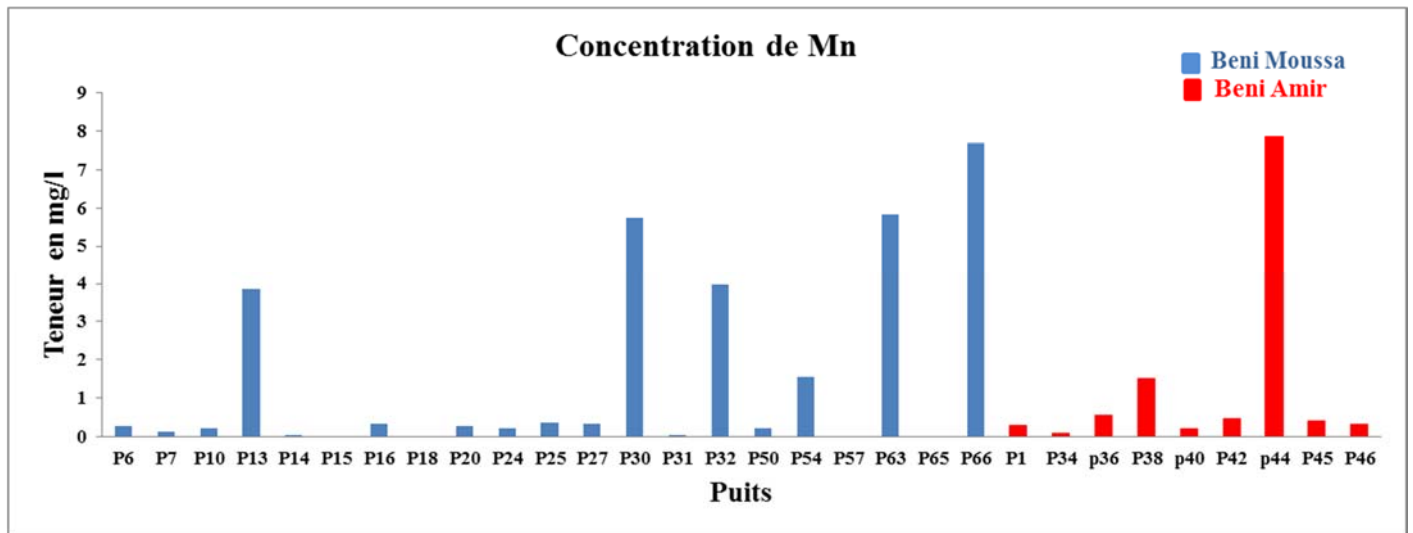


Figure 41: Variation spatiale des teneurs de Manganèse (en mg/l) des eaux souterraines de la plaine de Tadla

Pour le Manganèse, les valeurs mesurées dans les eaux échantillonnées, varient entre un minimum de 0,018 et un maximum de 7,84 mg/l, avec une moyenne de 1,43 mg/l, cette teneur en Mn dans les échantillons est au-dessous du seuil admissible fixé par l’OMS soit 0,5 mg/l à l’exception des puits P₁₃, P₃₀, P₃₂, P₃₈, P₄₄, P₅₄P₆₃ et P₆₆. Il agit surtout au niveau du cerveau et du système respiratoire, les symptômes d'un empoisonnement au manganèse sont un manque de mémoire, des hallucinations, et des problèmes aux nerfs. Le manganèse peut aussi provoquer la maladie de Parkinson, des embolies pulmonaires et des bronchites.

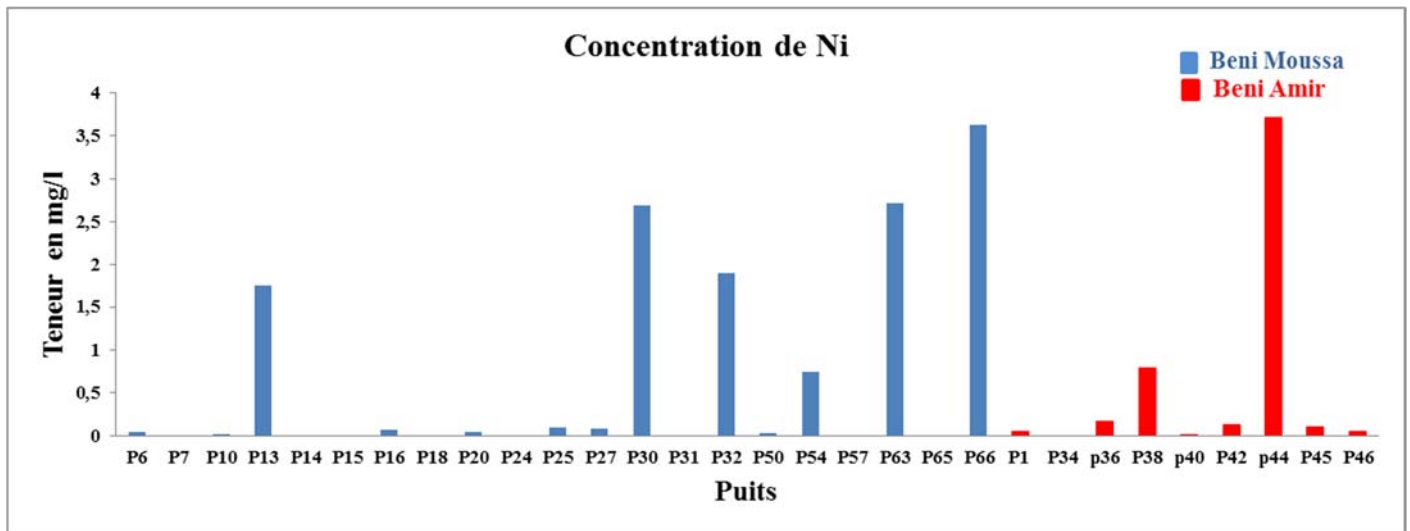


Figure 43: Variation spatiale des teneurs de Nickel (en mg/l) des eaux souterraines de la plaine de Tadla

Les valeurs du Nickel mesurées dans les eaux échantillonnées, varient entre un minimum de 0 et un maximum de 3,71 mg/l, avec une moyenne de 0,62 mg/l, cette teneur en Ni dans les échantillons est au-dessous du seuil admissible fixé par l’OMS soit 0,07 mg/l à l’exception des puits P13, P30, P32, P36, P38, P44, P54 P63 et P66. Il cause l’atteinte du système respiratoire, et cancérigène avéré.

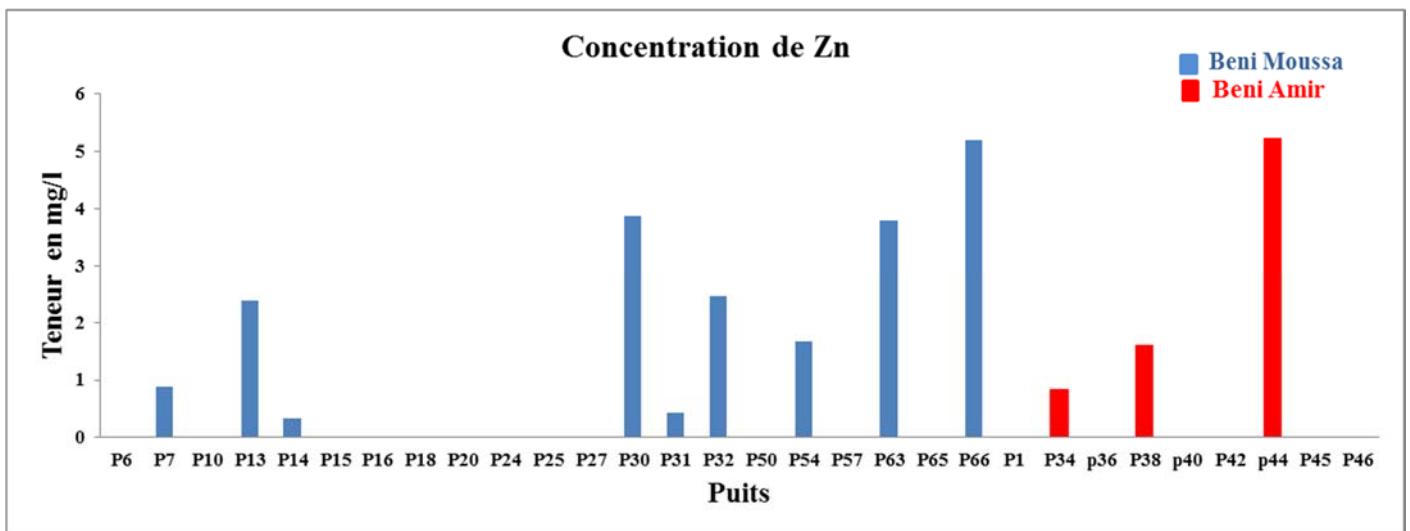


Figure 42: Variation spatiale des teneurs de Zinc (en mg/l) des eaux souterraines de la plaine de Tadla

La même observation pour le Zinc, il présente des valeurs mesurées dans les eaux échantillonnées, qui varient entre un minimum de 0 et un maximum de 5,21 mg/l, avec une moyenne de 0,95 mg/l, cette teneur en Ni dans les échantillons est au-dessous du seuil admissible fixé par l’OMS soit 3 mg/l à l’exception des puits P30, P44, P63 et P66. Les

suppléments de zinc ne présentent pas de toxicité notable, mais il peut présenter des effets secondaires à savoir la diarrhée, une irritation intestinale, des troubles rénaux, et une diminution de la réponse immunitaire.

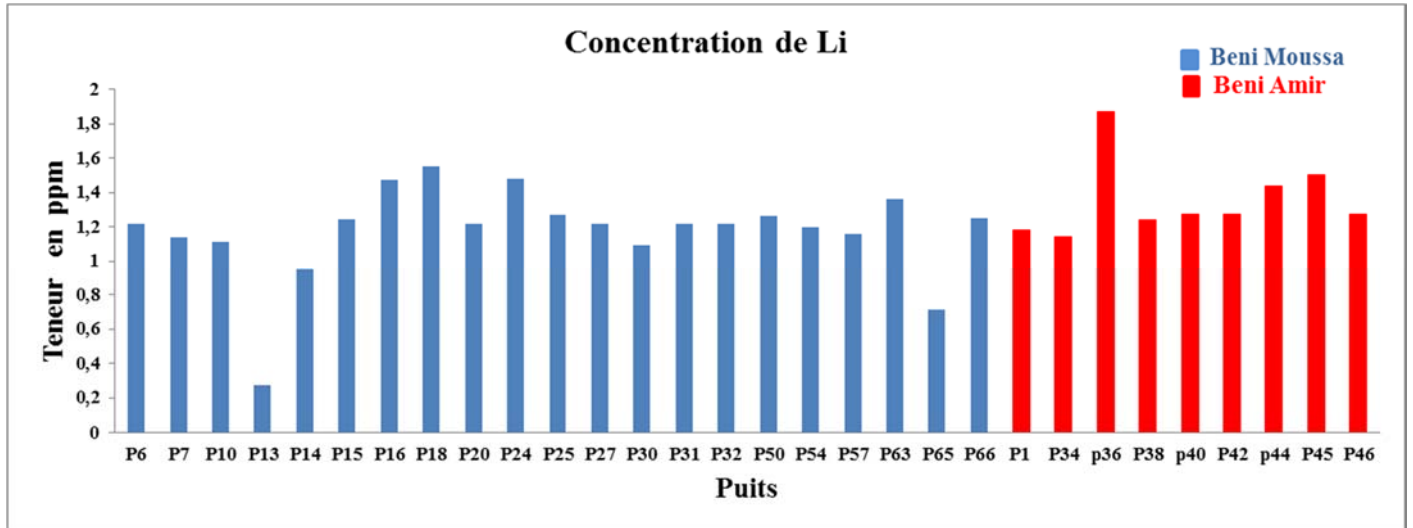


Figure 44: Variation spatiale des teneurs de Lithium (en mg/l) des eaux souterraines de la plaine de Tadla

Pour le Lithium, les valeurs mesurées dans les eaux échantillonnées, varient entre un minimum de 0,01 et un maximum de 1,44 mg/l, avec une moyenne de 0,3 mg/l, cette teneur en Li dans les échantillons est au-dessous du seuil admissible fixé par l’OMS soit 0,03 mg/l à l’exception des puits P7, P13, P30, P32, P38, P44, P54P63 et P66. Il cause des nausées, tremblements, soif (bouche sèche), viscosité de la pensée, diarrhée persistante, et pollakiurie (et polydipsie).

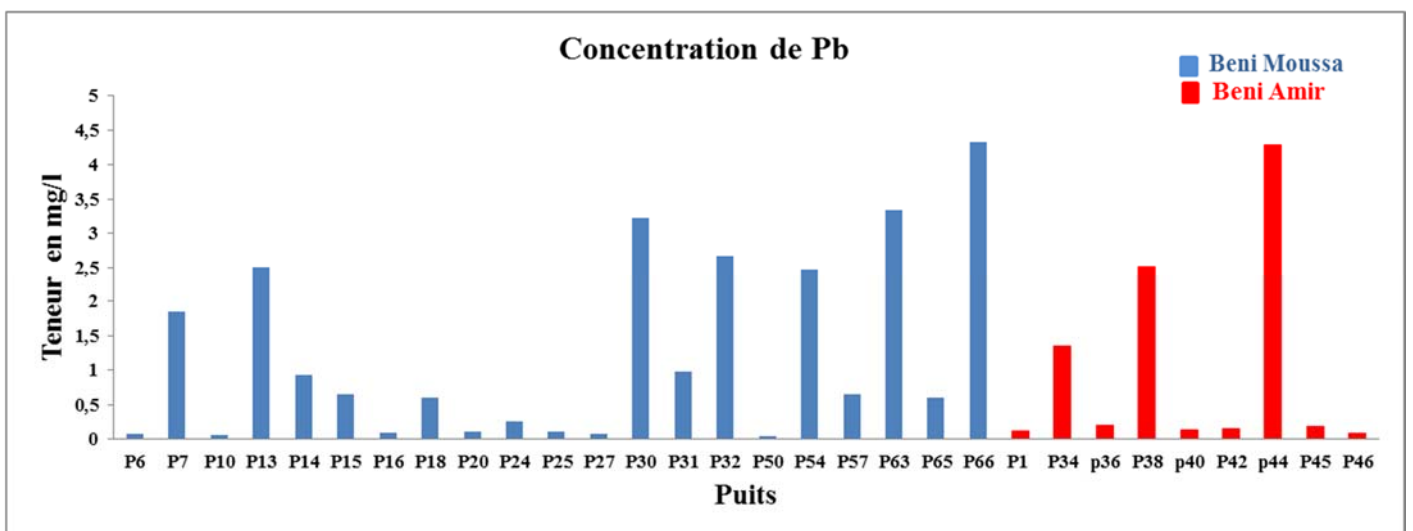


Figure 45: Variation spatiale des teneurs de Plomb (en mg/l) des eaux souterraines de la plaine de Tadla

Les valeurs du Plomb mesurées dans les eaux échantillonnées, varient entre un minimum de 0,002 et un maximum de 4,32 mg/l, avec une moyenne de 0,91 mg/l, cette teneur en Pb dans les échantillons est au-dessous du seuil admissible fixé par l’OMS soit 0,01 mg/l, à l’exception des puits P₇, P₁₃, P₃₀, P₃₂, P₃₈, P₄₄, P₅₄ P₆₃ et P₆₆. Il est neurotoxique, responsable de saturnisme, troubles du développement cérébral, perturbations psychologiques, difficultés d’apprentissage scolaire chez les enfants, et peut-être cancérigène.

Les différentes concentrations des éléments traces métalliques, dans les eaux souterraines de la plaine de Tadla, sont généralement dans la gamme standard admissible, à l’exception des puits P₇, P₁₃, P₃₀, P₃₂, P₃₈, P₄₄, P₅₄P₆₃ et P₆₆, qui présentent des dépassements des normes admissibles pour presque tous les éléments analysés.

Ces puits se situent dans les Béni Moussa (P₇ et P₁₃ à ouled nemma, P₃₀ route afourar, P₆₆ ouled gnaou) à proximité d’agglomération d’où l’hypothèse d’une contamination par les lixiviat des déchets solides, (P₃₈ et P₄₄ à ouled zemam) où la forte utilisation des engrais et des pesticides.

III. Variation spatiotemporelle relatives aux contaminations bactériologiques des eaux souterraines de la plaine de Tadla

Les agents pathogènes sont considérés comme l’essentielle menace à la santé publique qui est liée à l’eau de boisson. Les dangers de contamination de l’eau dépendent du fonctionnement d’un ensemble de succession de phénomènes, variables selon les conditions météorologiques (le régime pluviométrique, température, l’insolation), stationnelles (nature des sols, pente...) et les pratiques anthropiques. Ces faits peuvent contribuer à un transfert des bactéries vers la nappe et présenter un risque pour la population rural qui s’approvisionne en eau directement des puits ([214];[215]; [2]).

Les résultats de l’analyse bactériologique montrent que les eaux des puits analysées (P₃, P₅, P₁₇, P₂₀, P₂₂, P₃₄, P₃₆, P₅₂, P₅₄, P₆₇, P₆₉, P₇₃, P₇₅, et P₇₈) ont présenté des concentrations respectant les normes de l’OMS et normes marocaines, pour les bactéries coliformes totaux ou fécaux (norme étant 0 bactérie coliforme totaux/100 ml d’eau et 0 bactérie coliforme fécale/100 ml d’eau).

IV. Traitement statistique des résultats

➤ Analyse en composante principale (ACP)

Dans cette partie on va appliquer une méthode d'analyse de données multidimensionnelle en tenant compte du nombre de variables, 10, d'individu et le type de ces variables qui est quantitativement mesuré. Ce type de variables nécessite une méthode d'analyse factorielle qui permet de projeter et de réduire la dimension du tableau. On fait appel à la méthode ACP qui permet de projeter les variables et les individus sur le plan factoriel PC1-PC2 à l'aide du logiciel « The Unscrambler».

❖ Nuage de points projetés

D'après l'analyse effectuée en utilisant la méthode ACP, on peut utiliser jusqu'à cinq composantes pour expliquer le maximum d'informations.

Le cercle des corrélations est la projection du nuage des variables sur le plan des composantes principales, montre que les variables bien représentées sont celles qui sont proches du cercle on cite DBO5 et DCO sur l'axe PC1 et température, pH et matière organique sur l'axe PC2, tandis que celles proches de l'origine sont mal représentées.

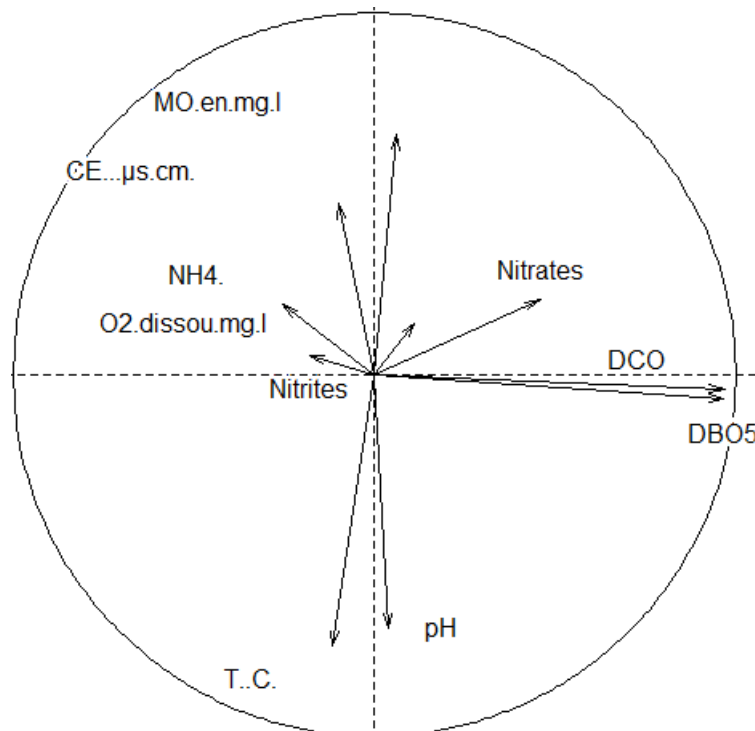


Figure 46: Plan factoriel PC1-PC2

❖ Contribution des variables

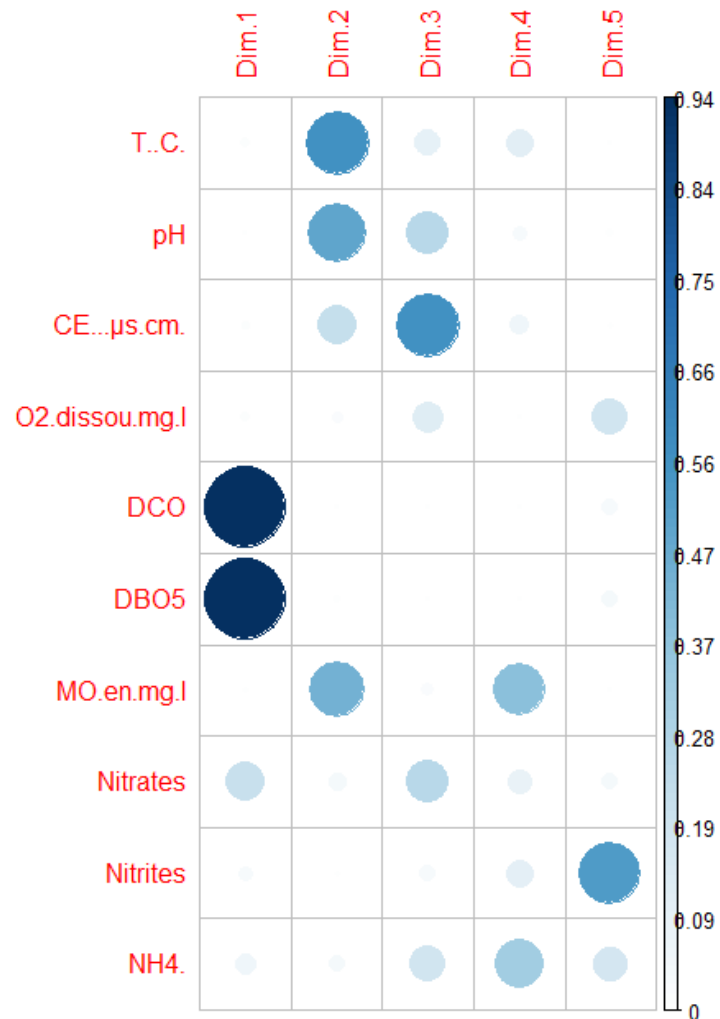


Figure 47: contribution des variables à la formulation des composantes

La figure 47, représente les variables et la contribution sur les composantes principales à savoir :

- DCO et DBO5 sont contribuées à la formulation de l'axe PC1 ;
- Température, pH et MO sont contribuées à la formulation de l'axe PC2 ;
- Pour la conductivité électrique elle est contribuée à la formulation de l'axe PC3 ;
- Les Nitrites sont contribués à la formulation de l'axe PC5.

❖ Classification des variables

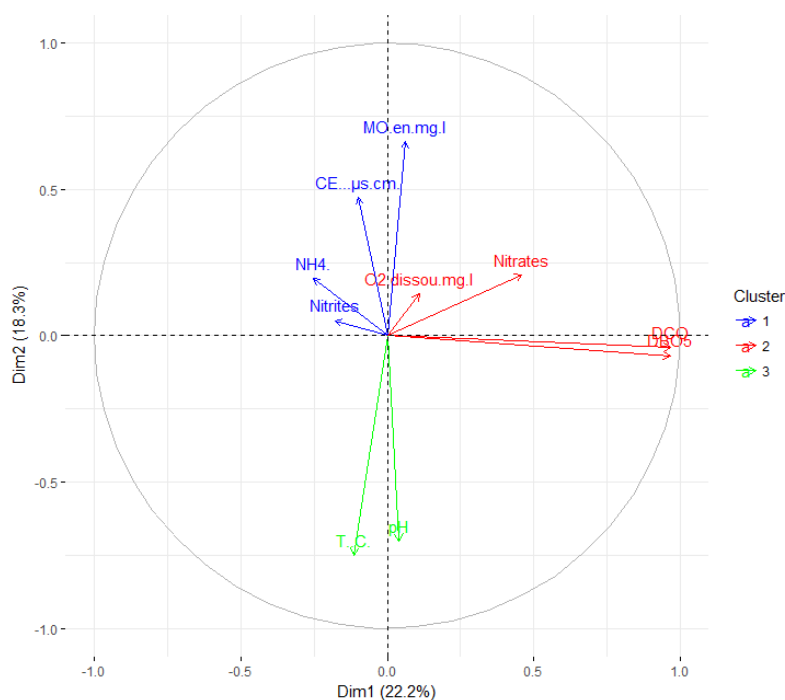


Figure 48: Classification des variables

On constate, d'après la figure 48, que les points de prélèvement des mesures sont séparés en trois classes selon les valeurs des variables, les classes sont réparties comme suit :

- Classe 1 (rouge) : cette classe est riche en DCO, DBO5, nitrate et O₂ dissous, cette classe représente les bény Moussa à côté des agglomérations où il y a une forte installation des fausses septiques, et les rejets domestiques.
- Classe 2 (verte) : cette classe a une valeur importante de pH et de Température par rapport aux autres échantillons.
- Classe 3 (Bleu) : les échantillons de cette classe contiennent une valeur de matière organique et CE élevée, par contre une faible valeur de T et pH. On constate aussi que ces points ont une valeur d'azote ammoniacal et des Nitrites importante par rapport aux autres points, cette classe représente les bény Amir où il y a une forte activité agricole, d'où l'utilisation des engrais et des amendements organiques.

Pour montrer la relation entre les différentes zones et les paramètres physicochimiques étudiés nous avons eu recours au résultat du Bi-plot suivant :

Chapitre II : les essais lysimétriques dans la station d'Ouled Gnaou

I. Introduction

L'intensification des activités agricole est couramment accompagnée d'un usage irrationnel généralement des produits agrochimiques et particulièrement des engrais azotés. L'excédent d'azote ayant échappé à l'absorption racinaire est sujet à la lixiviation des ions nitrates en profondeur, ce qui engendre le risque de pollution nitrique des eaux souterraines [216]. L'intensité de ce phénomène est liée à la capacité d'absorption de la culture, la texture du sol, la hauteur des précipitations ou d'irrigation, et la quantité d'azote minéral appliquée ou minéralisée à partir de la matière organique naturelle du sol ou de celle apportée [217].

Dans le cadre de nos travaux de recherches, une expérimentation lysimétrique, menée sur deux types de cultures, dont la pomme de terre et les agrumes. Elle a été réalisée dans le Tadla, plus précisément dans la station expérimentale d'Ouled Gnaou, qui se situe au périmètre des Béni Moussa Est. Dans cette station on a eu la chance d'avoir un site atelier, qui a servi à l'étude et au suivi de la dynamique de l'eau dans les sols. Il est destiné essentiellement à la caractérisation et à la prédiction des écoulements de l'eau et du transport des composés polluants. Pour cela on a installé des lysimètres qui sont des outils qui permettent un suivi quantitatif de la percolation du nitrate au-delà de la zone racinaire.

II. Matériel et méthodes

II.1. Les lysimètres

L'analyse des inconvénients et avantages des systèmes lysimétriques a dirigé le choix vers un système de type semi fermé, c'est le type qui répond à l'exigence essentielle de la lysimétrie, il permet de mesurer en même temps la solution de drainage et sa concentration dans un volume parfaitement défini tout en permettant une exploitation en plein champ, sans trouble pour les cultures.([218] ; [219]).Ce système permanent permet une étude autant complète que possible, les mesures obtenues permettent l'appréciation de l'impact, sur le milieu, des pratiques agricoles mises en œuvre[220].

Après compilation des données de réalisations pratiques et des paramètres à respecter pour une lysimétrie de qualité selon la FAO([218] ;[220]), six lysimètres de type semi fermés sont installés en plein champ dans des exploitations pilotes, trois lysimètres sont installés à différentes profondeurs (20, 40, et 60cm) vue sole d'agrumes qui sont irrigués par goutte à

goute, tandis que les trois autres lysimètres sont installés aussi à différentes profondeurs (20, 40, et 60cm) vue sole de la pomme de terre irriguée par gravitaire.

Les lysimètres en sol remanié ont été installés en creusant une fosse dans laquelle on



Figure 50: la sole des agrumes et la sole des pommes de terre

dépose la cuve lysimétrique, qui est construite avec une géomembrane en PVC, ce matériel est léger, souple et résistant. Elle est remplie en premier lieu de gravier, de sable fin, et des couches successives du sol, soigneusement séparées lors du creusement, sur base des observations du profil pédologique. La cuve lysimétrique est circulaire, de 80cm de longueur et 30cm de largeur. Elle est placée verticalement sous la surface du sol, d'où l'appellation « système semi-fermé ».



Figure 51: L'installation des lysimètres

Un tuyau perforé perce le bas de la cuve est utilisé pour évacuer les percolats à l'aide d'une pompe.



Figure 52: le tuyau et la pompe utilisés pour l'évacuation des percolats

II.2. Classification pédologique

Les six lysimètres sont installés sur des sols de structure argileuse, mais ne présente aucune contrainte pour les cultures, ils ont un pH alcalin, et ne présentent aucun problème de salinité puisque les valeurs de CE, de chlore et de sodium sont faibles. Ils ont d'une part des valeurs faibles en azote minérale, d'autre part des valeurs élevées en phosphore et potassium, pour les oligoéléments, les sols présentent des valeurs adéquates.

II.3. Les données météorologiques

Les données climatologiques mesurées à la station d'ouled gnaou renseignent sur la température moyenne (°C), les précipitations (mm), le nombre de jours de précipitations (j), l'évapotranspiration (mm), la vitesse de vent (km/h) et la durée d'insolation (h) (voir partie présentation de site d'étude).

Brièvement, ces différentes mesures des paramètres climatologiques montrent une tendance globale à des températures allant vers les extrêmes (été chaud et hiver froid) et des précipitations globales allant de 150mm à 450mm.

Ces données permettent d'apprécier l'efficacité d'infiltration des eaux dans les lysimètres en corrélation avec les saisons culturales et les besoins en eau des plantes.

III. Résultats et discussions

III.1. Les agrumes

Les agrumes sont une culture pérenne, c'est pourquoi on a fait un suivi durant toute l'année 2017. Les données de la pluviométrie (P) et les données d'évapotranspiration (ETP) permettent de calculer le déficit hydrique des sols (P-ETP). Lorsque (P-ETP) est négatif, l'eau qui tombe à la surface d'un sol ne peut pas s'infiltrer en profondeur d'une part, c'est-à-dire quand l'évapotranspiration est plus importante que la pluviométrie. D'autre part, quand (P-ETP) est positif, cela indique que le stock en eau du sol est approvisionné, ce qui pourra mener à une infiltration. Le tableau ci-dessous fait une synthèse de l'irrigation des lysimètres installés dans les agrumes.

Tableau 25 : synthèse de l'irrigation des lysimètres installés dans les agrumes

Date	Nbre d'irrigation	Dose d'engrais (mg/l)	Pluies (mm)	déficit cumulé (mm)
Janvier	6	16,36	43,9	0
Février	7	18,88	62,2	0
Mars	15	54,9	6,2	0
Avril	25	74,1	30,4	0
Mai	31	104,78	0	3,95
Juin	29	121,13	5	17,19
Juillet	31	130,01	0	22,92
Août	31	124,81	0	24,3
Septembre	23	74,68	0	6,9
Octobre	23	70,48	0	13,18
Novembre	11	31,54	36	4,38
Décembre	5	14,15	41,6	3,88

III.1.1. Qualité des percolats

Des graphiques de synthèse sont réalisés pour les paramètres de DCO, nitrate, nitrite, et azote ammoniacal, pour les trois niveaux de profondeur dans la culture des agrumes, afin de savoir la migration des nitrates dans les trois horizons. Chaque graphique rassemble, depuis le mois janvier jusqu'à décembre 2017. Les résultats sont illustrés dans les figures ci-dessous.

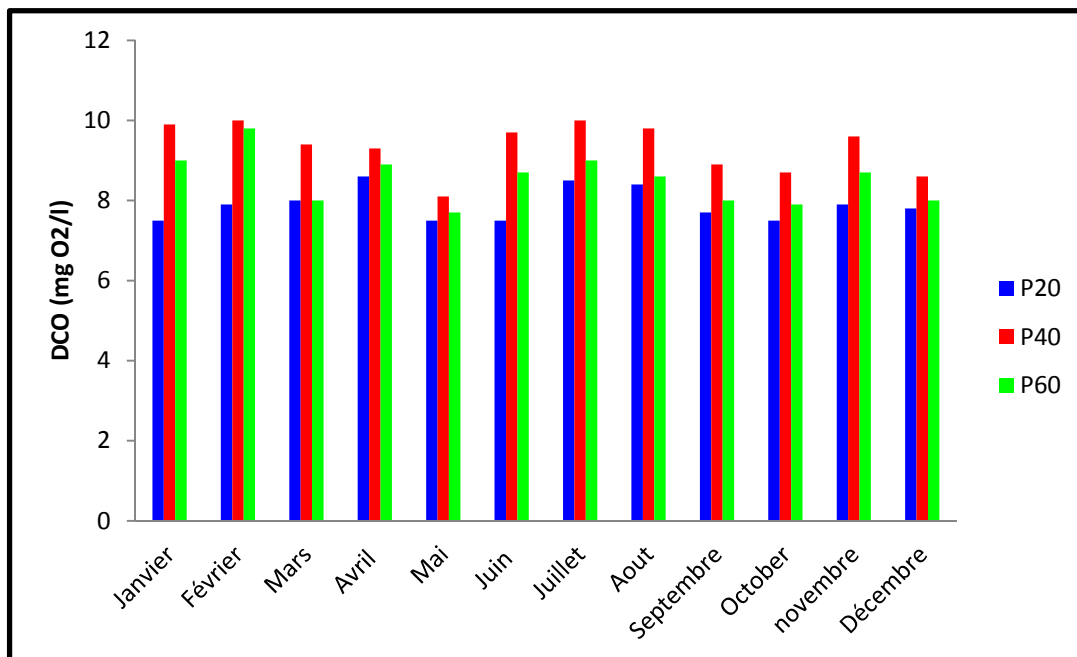


Figure 53: variation mensuelle de la DCO dans l'eau de drainage à différentes profondeurs

Les valeurs de la demande chimique en oxygène des eaux drainées, varient entre un minimum de 7,5 mg/l et un maximum de 8,6 mg/l pour la profondeur 20 cm, un minimum de 8,1 mg/l et un maximum de 10,7 mg/l pour la profondeur 40 cm, et un minimum de 7,7 mg/l et un maximum de 9,8 mg/l pour la profondeur 60 cm, ces valeurs indiquent que c'est une eau d'excellente qualité (inférieur à 200mg/l). On observe que les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans le niveau 40 cm de profondeur.

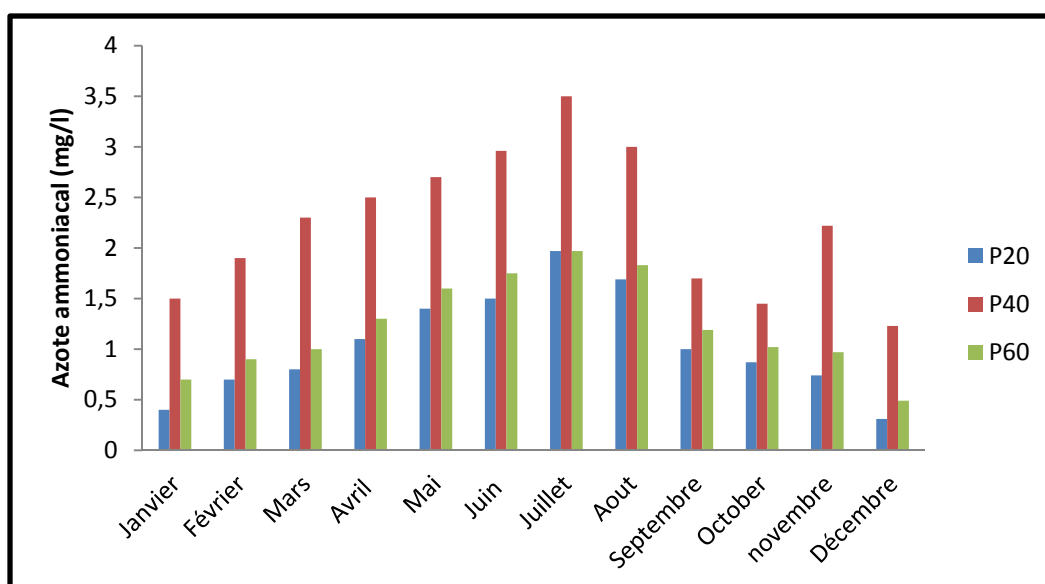


Figure 54: variation mensuelle de l'Azote ammoniacal dans l'eau de drainage à différentes profondeurs

Les valeurs de l'azote ammoniacal des eaux drainées, varient entre un minimum de 0,31 mg/l et un maximum de 1,96 mg/l pour la profondeur 20 cm, un minimum de 1,23 mg/l et un maximum de 3,5 mg/l pour la profondeur 40 cm, et un minimum de 0,49 mg/l et un maximum de 1,97 mg/l pour la profondeur 60 cm, ces valeurs indiquent que les eaux dépassent la norme marocaine fixée à 0,5 mg/l, surtout dans le niveau 40 cm de profondeur.

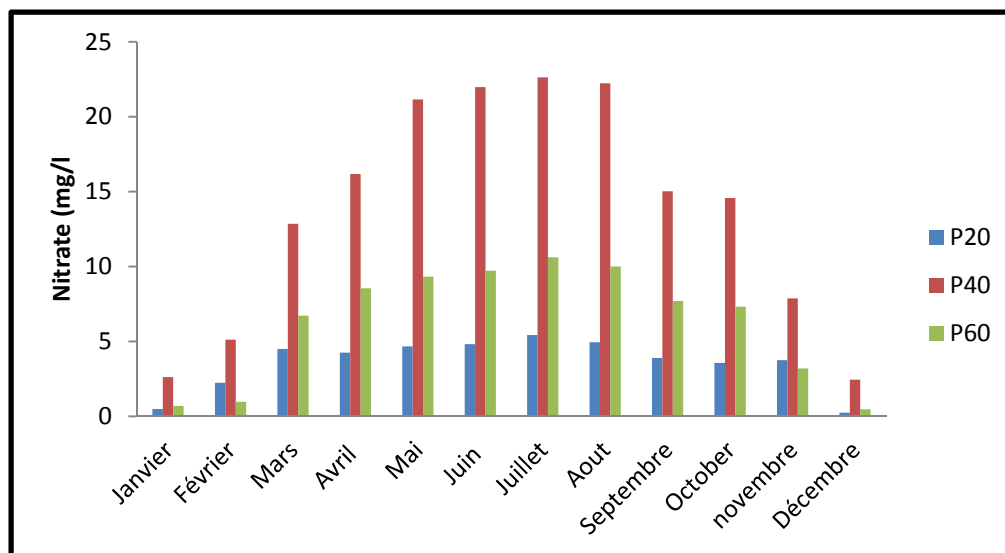


Figure 55: variation mensuelle des Nitrates dans l'eau de drainage à différentes profondeurs

Les valeurs des nitrates des eaux drainées, varient entre un minimum de 0,25 mg/l et un maximum de 5,42 mg/l pour la profondeur 20 cm, un minimum de 2,45 mg/l et un maximum de 22,62 mg/l pour la profondeur 40 cm, et un minimum de 0,47 mg/l et un maximum de 10,62 mg/l pour la profondeur 60 cm, ces valeurs indiquent que c'est une eau de bonne qualité (inférieur à 50mg/l). On observe que les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans le niveau 40 cm de profondeur.

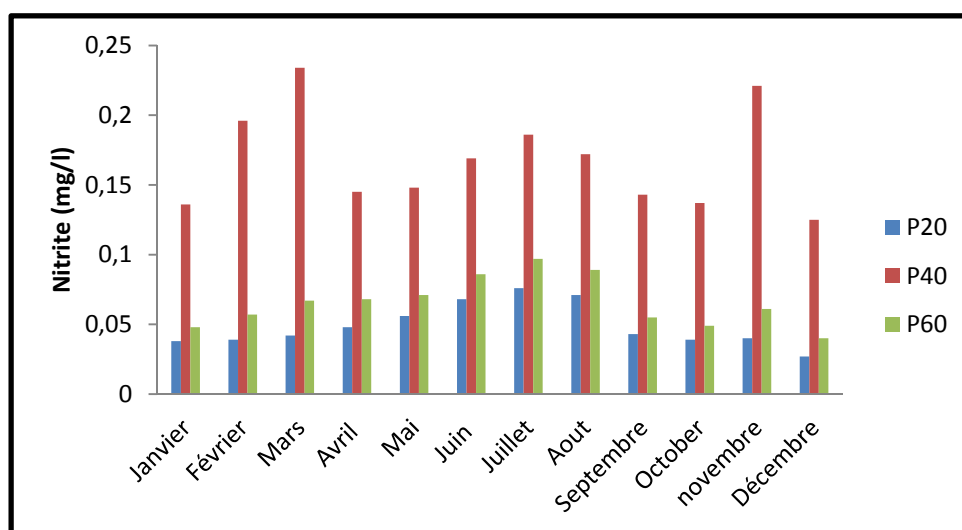


Figure 56: variation mensuelle des nitrites dans l'eau de drainage à différentes profondeurs

Les valeurs des nitrites des eaux drainées, varient entre un minimum de 0,027 mg/l et un maximum de 0,076 mg/l pour la profondeur 20 cm, un minimum de 0,12 mg/l et un maximum de 0,23 mg/l pour la profondeur 40 cm, et un minimum de 0,04 mg/l et un maximum de 0,097 mg/l pour la profondeur 60 cm, ces valeurs indiquent que c'est une eau de bonne qualité (inférieur à 0,5mg/l). On observe que les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans le niveau 40 cm de profondeur.

III.2. Pomme de terre

La pomme de terre est une culture qui est semée en février et récoltée en juin c'est pour cela que notre étude s'est étalée sur 5 mois.

- *Epandage de la fumure de fond*

Désignation	Dates	Mode	U/ha	Kg/essai	Nature
• Fumier	/	/	/	/	/
• Azote	20/02/2017	manuel	100	250 kg	Sulfate d'ammoniaque 21 %
• P2O5	20/02/2017		180	250kg	Super triple 45 %
• K2O	20/02/2017		200	200 kg	Sulfate de potasse 48 %

- *La plantation*

- Date de plantation : 24/02/2017

- Distance de plantation : 0,3 x 0,70

- *Conduite de la culture*

1) Fumure d'entretien

Désignation	Date	Mode	U/ha	Kg/essai	Nature
azote	06/04/2017	Manuel	30		Urée 46
	20/04/2017	Manuel	30		Ammonitrate
	05/05/2017	Manuel	30		ammonitrate

2) Les irrigations (Mode d'irrigation gravitaire, dates et doses)

Dates	Doses (mm)	Dates	Doses (mm)
26/02/2017	96	16/05/2017	96
10/03/2017	96	25/05/2017	96
06/04/2017	96	06/06/2017	96
17/04/2017	96		
06/05/2017	96		

III.2.1. Qualité des percolats

Des graphiques de synthèse sont réalisés pour les paramètres de DCO, nitrate, nitrite, et azote ammoniacal, pour les trois niveaux de profondeur dans la culture de la pomme de terre, afin de savoir la migration des nitrates dans les trois horizons. Chaque graphique rassemble, depuis le mois janvier jusqu'à décembre 2017. Les résultats sont illustrés dans les figures ci-dessous.

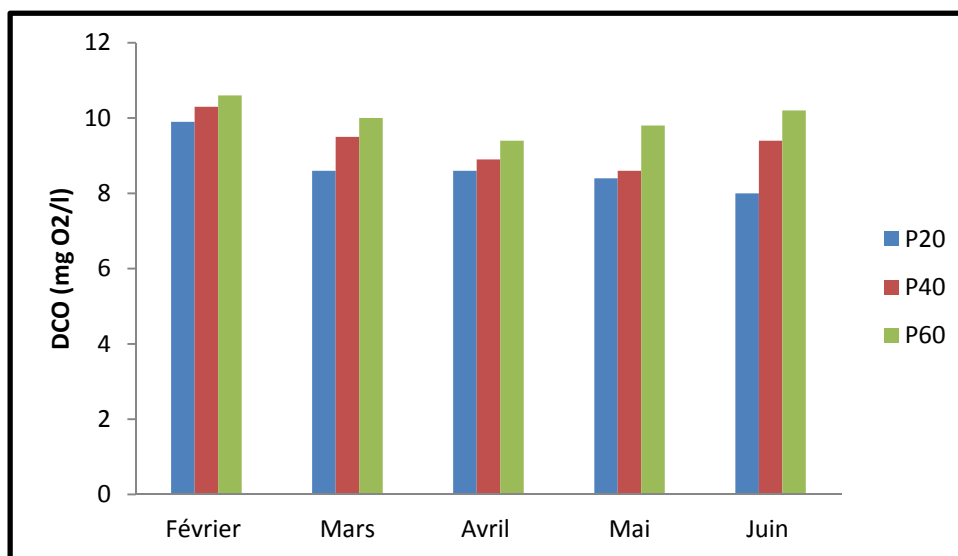


Figure 57: variation mensuelle de la DCO dans l'eau de drainage à différentes profondeurs

Les valeurs de la demande chimique en oxygène des eaux drainées, varient entre un minimum de 8 mg/l et un maximum de 9,9 mg/l pour la profondeur 20 cm, un minimum de 8,6 mg/l et un maximum de 10,3 mg/l pour la profondeur 40 cm, et un minimum de 9,4 mg/l et un maximum de 10,6 mg/l pour la profondeur 60 cm, ces valeurs indiquent que c'est une eau d'excellente qualité (inférieur à 200mg/l). On observe que les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans le niveau 60 cm de profondeur.

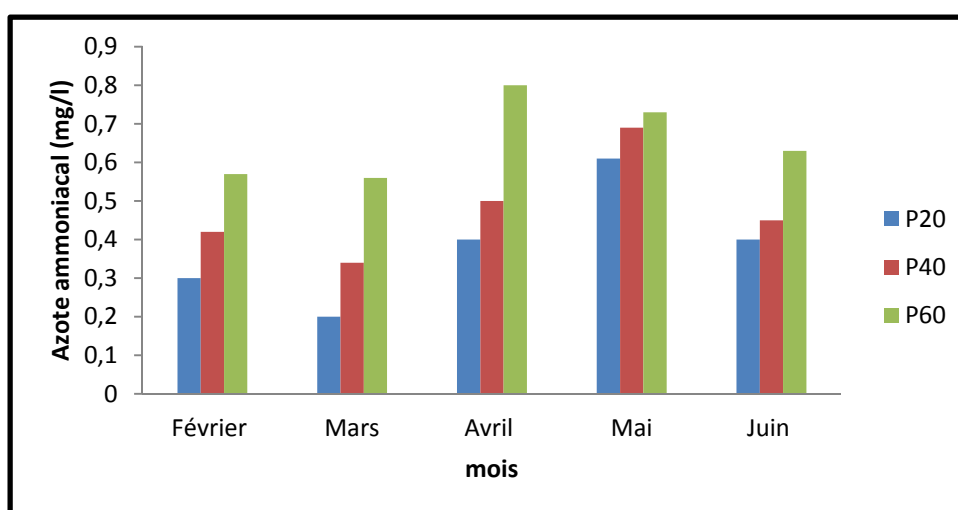


Figure 58: variation mensuelle de l'Azote ammoniacal dans l'eau de drainage à différentes profondeurs

Les valeurs de l'azote ammoniacal des eaux drainées, varient entre un minimum de 0,2 mg/l et un maximum de 0,61 mg/l pour la profondeur 20 cm, un minimum de 0,34 mg/l et un maximum de 0,69 mg/l pour la profondeur 40 cm, et un minimum de 0,56 mg/l et un maximum de 0,8 mg/l pour la profondeur 60 cm, ces valeurs indiquent que les eaux dépassent la norme marocaine fixée à 0,5 mg/l dans le niveau 60 cm de profondeur.

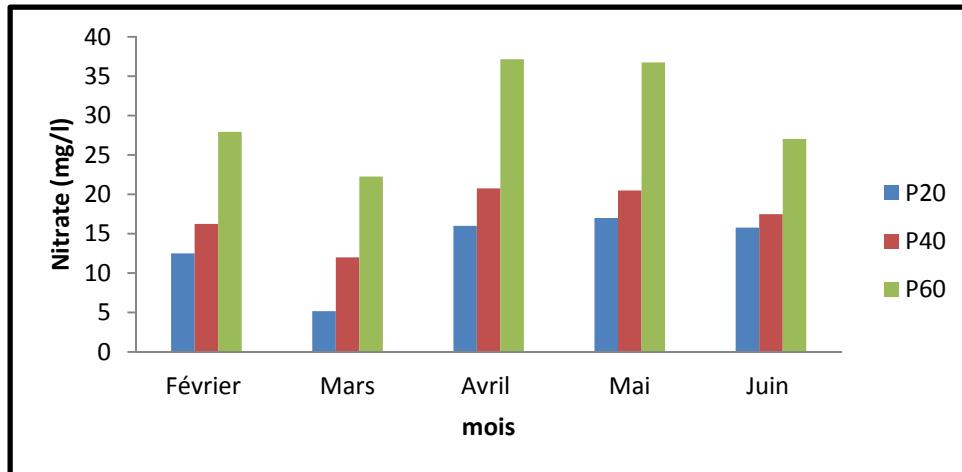


Figure 59: variation mensuelle des nitrates dans l'eau de drainage à différentes profondeurs

Les valeurs des nitrates des eaux drainées, varient entre un minimum de 5,17 mg/l et un maximum de 17 mg/l pour la profondeur 20 cm, un minimum de 12 mg/l et un maximum de 20,75 mg/l pour la profondeur 40 cm, et un minimum de 22,25 mg/l et un maximum de 37,15 mg/l pour la profondeur 60 cm, ces valeurs indiquent que c'est une eau de bonne qualité (inférieur à 50mg/l). On observe que les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans le niveau 60 cm de profondeur.

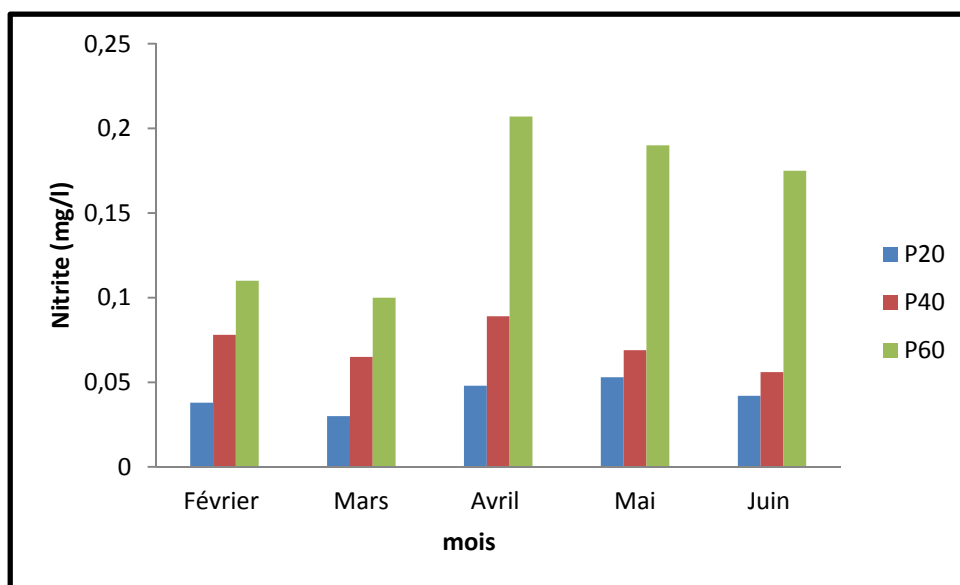


Figure 60: variation mensuelle des nitrites dans l'eau de drainage à différentes profondeurs

Les valeurs des nitrites des eaux drainées, varient entre un minimum de 0,03 mg/l et un maximum de 0,053 mg/l pour la profondeur 20 cm, un minimum de 0,056 mg/l et un maximum de 0,089 mg/l pour la profondeur 40 cm, et un minimum de 0,1 mg/l et un maximum de 0,207 mg/l pour la profondeur 60 cm, ces valeurs indiquent que c'est une eau de bonne qualité (inférieur à 0,5mg/l). On observe que les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans le niveau 60 cm de profondeur.

IV. Conclusion

Sur la base des résultats obtenues dans cette partie, on peut conclure que les lysimètres installés dans les terrains agricoles exploités, remplissent correctement leur tâche de suivi de la qualité des eaux de percolation en voie de migration vers les eaux souterraines et ce, malgré quelques arrangements essentiels à leurs débuts.

Dans la culture des agrumes où on a installé les lysimètres de suivi en 2017, on observe que les valeurs les plus élevées de nitrate, nitrite, DCO, et de l'azote ammoniacal sont remarquées dans le niveau 40, ce qui est peut être expliqué du fait que l'irrigation est en mode goutte à goutte, c'est-à-dire il n'y a pas assez d'eau pour que les éléments migrent vers les niveaux les plus profonds et alors vers les eaux souterraines. Tandis que dans la culture de pomme de terre implantée en 2017, et irriguée par gravitaire, on observe une migration du nitrate, du nitrite, DCO et de l'azote ammoniacal des horizons de surface vers les horizons de profondeur, au cours des essais lysimétriques, les valeurs les plus élevées sont trouvées dans le niveau 60 et par la suite ils sont percolées vers les eaux souterraines. Ceci est confirmé par les mesures qui ont été faites au sein du laboratoire des teneurs en ces éléments dans l'eau de percolation qui est récoltée après chaque irrigation.

L'assortiment des fertilisations appliquées, des données climatiques, des observations lysimétriques, et des données culturales, constitue un appui adéquat à une gestion entière de l'agriculture intense telle qu'elle est pratiquée actuellement, et à la protection des eaux souterraines vis-à-vis de la pollution nitrique. Après comparaison entre le mode d'irrigation gravitaire et le mode goutte à goutte, on a trouvé que ce dernier est plus efficace et ne permet pas la migration des éléments indésirables vers les eaux souterraines.

CONCLUSION GENERALE

Dans la plaine de Tadla, les études de l'impact de la pollution sur la qualité des eaux souterraines se sont multipliées. Les aquifères sont des écosystèmes préférables pour ce type d'études, surtout les plus exploités, notamment dans cette région où l'usage des intrants dans l'agriculture est intensif, ce qui a causé une pollution de plus en plus grave des eaux souterraines.

Les résultats obtenus permettent de conclure qu'il y a une pollution remarquable par les nitrates et d'autres intrants, dans certains endroits où il y a une forte activité agricole, et ce suite au lessivage des fertilisants chimiques et organiques, soit par les eaux d'irrigation ou les eaux pluviales. La variation spatiotemporelle des paramètres physicochimiques des eaux souterraines de la plaine de Tadla a démontré que :

- La température de l'eau souterraine dans l'aquifère de Tadla varie entre 17,1 °C et 28 °C, avec une moyenne de 21,27°C ;
- Le pH de la région d'étude durant les campagnes de prélèvement, présente une faible variation entre les différents puits, il est basique à neutre (varie entre 6,08 et 8,4) ;
- L'analyse montre que le niveau statique de la nappe phréatique a une tendance générale à l'abaissement, il varie entre 7m et 80m de profondeur;
- La conductivité électrique au niveau de la plaine montre que la catégorie des eaux sont en général salines à modérément salines, elle varie entre 400µs/cm et 6990 µs/cm ;
- La teneur en oxygène dissous des échantillons des eaux souterraines varie entre un minimum de 4,93 mg/l, et un maximum de 10,36 mg/l. Selon les normes de qualité, les échantillons sont de bonne qualité ;
- Les valeurs de la demande chimique en oxygène des eaux étudiées, sont élevés, elles varient entre 115,2 mg d'O₂/l et 195,2 mg d'O₂/l, nos échantillons sont variables de qualité excellente à mauvaise qualité ;
- Les valeurs de la demande biologique en oxygène des eaux étudiées, sont généralement élevées, elles varient entre 56,64 mg d'O₂/l et 293,64 mg d'O₂/l ;
- La matière organique des eaux étudiées présente des valeurs élevées, variant entre 0,32 mg/l et 5,44 mg/l;
- La majorité des puits présente des teneurs en nitrates supérieures à la norme conseillée par l'OMS (50 mg/l). les valeurs varient entre 24,45 mg/l et 140,81 mg/l ;

- Les résultats des concentrations en nitrites des eaux étudiées, dépassent les normes marocaines (0,5 mg/l), avec des valeurs variant entre 1,76 mg/l et 2,48 mg/l ;
- Les valeurs de l'azote ammoniacal des eaux étudiées ne dépassent pas les normes marocaines N.M qui sont fixées à 0,5 mg/l pour la plupart des points d'eau échantillonnées, avec des valeurs variant entre 0,003 mg/l et 8 mg/l ;
- Pour le sodium, les analyses des échantillons des eaux des puits ont montré que les teneurs en sodium de presque la totalité des puits ne dépassent pas les normes recommandées par l'OMS, fixées à 150 mg/l, avec des valeurs variant entre 9,93 mg/l et 680,3 mg/l ;
- Les valeurs du calcium des eaux étudiées obtenues dépassent la norme de l'OMS qui est de 150 mg/l, avec des valeurs variant entre 247,1 mg/l et 942,5 mg/l ;
- Les valeurs du magnésium des eaux étudiées ne dépassent pas les normes marocaines qui sont fixées à 50 mg/l pour la plupart des points d'eau échantillonnées ;
- Les concentrations en potassium dans les eaux souterraines de la plaine de Tadla varient entre un minimum de 1,02 mg/l et un maximum de 8,68 mg/l avec une moyenne de 4 mg/l. Ces résultats des puits analysés ne dépassent pas les normes de l'OMS (12 mg/l).

Pour préciser l'aptitude à l'irrigation des eaux de la nappe de la plaine de Tadla, nous utilisons les valeurs de la conductivité électrique et celles du SAR. Les valeurs du SAR des eaux étudiées, varient entre un minimum de 0,78 et un maximum de 84,7 ; avec une moyenne de 10,94 ; 74% des puits analysés appartient à la classe S1, où les eaux sont utilisables pour l'irrigation de presque tous les sols, et le danger d'alcalinisation est réduit, bien que certaines cultures sensibles au sodium puissent être gênées, 20% des puits analysés appartient à la classe S2, où le danger d'alcalinisation des sols est appréciable dans les sols à textures fine et à forte capacité d'échange, surtout dans la condition de faible lessivage, l'eau est utilisable sur les sols de texture grossière, ou sur les sols organiques ayant une bonne perméabilité, et 6% des puits analysés appartient à la classe S4, où les eaux souvent inutilisables pour l'irrigation, présentant un fort danger d'alcalinisation, ces eaux sont utilisées pour l'irrigation, seulement si leur salinité permet l'addition de calcium ou si le sol en contient suffisamment.

Les différentes concentrations des éléments traces métalliques, dans les eaux souterraines de la plaine de Tadla, sont généralement dans la gamme standard admissible, à l'exception des puits P7, P13, P30, P32, P38, P44, P54P63 et P66, qui présentent des dépassements des normes

admissibles pour presque tous les éléments analysés, ces puits se situent dans les Béni Moussa, dont l'agriculture est intense alors une forte utilisation des engrais et pesticides.

L'ACP des paramètres physicochimiques montre la présence de trois groupes, les échantillons du groupe I se trouvent en proportion élevée avec la variable température de puits et des teneurs faibles des variables DCO, CE et nitrates. Pour les échantillons du groupe II, ils ont des teneurs importantes de pH, azote et nitrites et pour le groupe III on remarque des proportions élevées des variables DCO, CE et nitrates avec des températures faibles des puits.

Pour les essais lysimétriques, Après comparaison entre le mode d'irrigation gravitaire et le mode goutte à goutte, il s'est avéré que ce dernier est plus efficace et ne permet pas la migration de la pollution vers les eaux souterraines, néanmoins un risque de salinisation des sols est possible vu la conductivité électrique élevée des eaux d'irrigation.

PERSPECTIVES

La réalisation de ce travail, nous a inspiré de poursuivre cette étude, afin de toucher les différents aspects relatifs à la pollution et son éventuelle évolution dans la zone d'étude :

- Aborder, le problème des métaux lourds des eaux souterraines par des études plus approfondies ;
- Travailler sur les alternatives qui pourraient substituer les intrants agricoles ;
- Poursuivre les études sur les variations de certains ETM ;
- Sensibilisation des agriculteurs sur les dangers de la pollution agricole sur la qualité des sols et des eaux superficielles ou souterraines. Ceci peut passer par une optimisation de la fertilisation par le biais d'analyses des sols et des calculs des bilans de fertilisation ;
- Poursuivre les études sur la base des données obtenues, afin de toucher les différents aspects relatifs à la pollution et son éventuelle évolution dans la zone d'étude ;
- Approfondir l'étude sur d'autres métaux lourds des eaux souterraines et détecter les causes de cette pollution ;
- Cette étude mérite d'être menée sur les différentes saisons de l'année, et sur plusieurs années pour avoir une bonne caractérisation des eaux souterraines dans la plaine de Tadla.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] MATEE, 2002 ; Observatoire National de l'environnement du Maroc, Monographie régionale de l'environnement Région de l'oriental, Profil environnemental ;
- [2] Hameed Saleh Ali YAHYA ; Contribution à l'Etude des Ressources en Eau dans la plaine des Triffa : Impact de la Pollution Anthropique sur la Qualité des Eaux Souterraines. 2017 ;
- [3] BENKADDOUR R. 1997. Contribution à l'étude de la salinité et de la pollution par les nitrates des eaux souterraines de la plaine des Triffa « Basse Moulouya ». Thèse de 3^{ème} cycle. Univ. Mohammed premier. Fac. Sc. Oujda, 97pp ;
- [4] CHETOUANI B., & DAMOU S. 1993. Diagnostic des problèmes d'engorgement des sols, de drainage et de la qualité des eaux et des sols dans la plaine des Triffa (Basse Moulouya), Mémoire de 3^{ème} cycle en agronomie. I.A.V Hassan II. Rabat. Volume 1. 171pp.
- [5] FEKKOUL A., ZARHLOULE Y., BOUGHRIBA M., BARKAOUI A.E., JILALI A. ET BOURI S. 2013. Impact of anthropogenic activities on the groundwater resources of the unconfined aquifer of Triffa plain (Eastern Morocco). Arabian Journal of Geosciences, 6(12): 4917-4924.
- [6] FETOUANI S., SBAA, M., VANCLOOSTER M. & BENDRA B. 2008. Assessing ground water quality in the irrigated plain of Triffa (north-east Morocco). Agricultural Water Management, 95(2): 133-142.
- [7] MATEE, 2001. Rapport l'Etat de l'environnement au Maroc: Utilisation des pesticides en agriculture, 20p.
- [8] AGHZAR N., BERDAI H., BELLOUTI A. et SOUDI B. 2002. Pollution nitrique des eaux souterraines au Tadla (Maroc). Revue des Sciences de l'Eau. Rev. Sci. Eau, 15/2, pp : 459-610.
- [9] Bitar K., Jouilil I., Delhi R., Hilali A., Benzha F., Kaoukaya A., Rhinane H., Baidder L., Tahiri M, (2013). Evaluation Qualitative Et Identification Des Sources De Pollution Du Bassin Versant De L'oum Erbia, Maroc. Larhyss Journal, Issn 1112-3680, N°14, Juin 2013, pp. 161-177 ;
- [10] ORMVAT (2015). Etat d'avancement des projets. Site de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole de Tadla, ORMVAT ;
- [11] Hammani A., (2012). L'utilisation Conjuguée Des Eaux Souterraines Et Des Eaux De Surface En Irrigation ;
- [12] DUSQUENE S. 1992. Bioaccumulation métallique et métallothioneines chez trois espèces de poissons du littoral Nord-Pas De Calais. Thèse de Doctorat en Biologie et Santé. Lille: Université des Sciences et Techniques de Lille : 263.
- [13] ARKOC, 2014. Assessment of trace metal contamination and exchange between water and sediment systems in the To Lich River in inner Hanoi, Vietnam. Environmental Earth Sciences.
- [14] WANG S.X., XING J., CHATANI S., HAO J.M., KLIMONT Z., COFALA J. AND AMANN M. 2011. Verification of anthropogenic emissions of china by satellite and ground observations atmos. environ. 45 6347- 6358.
- [15] AITEC, 1994 ; Eau et Assainissement dans les villes du monde <http://www.globenet.org/aitec/index.htm> (02/03/05);
- [16] UNESCO, 2003 ; Faits et chiffres : Un aperçu des ressources en eau en Afrique, 2003 Année Internationale de l'eau, www.wateryear2003.org/fr, mise à jour 2004 (02/03/05) ;
- [17] UNESCO, 2003 ; l'eau pour les hommes, l'eau pour la vie, rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau, (résumé) <http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001295/129556F.pdf>. (28/02/05) ;
- [18] GLOBAL ENVIRONNEMENT OUTBOOK 3 ; le passé, le présent et les perspectives d'avenir, Aperçu de la situation dans le monde [www.gridamo/geo/geo3/french/294- htm](http://www.gridamo/geo/geo3/french/294-htm) -20k, (09 -03-05) ;
- [19] FONTAINE (S.), 2003 ; Alerte générale http://eau.apinc.org/article.php?id_article=21 (14/03/05) ;
- [20] Léocadie ODOULAMI ; (2009) ; Thèse de doctorat sous le titre : La problématique de l'eau potable et la santé humaine dans la ville de Cotonou (République du Bénin) ; Université d'Abomey-Calavi ; Ecole Doctorale Pluridisciplinaire « Espace, Société et Développement » ;

- [21] UNICEF.09/2006. Un bilan de l'eau et de l'assainissement. Progrès pour les enfants : NUMERO 5 ;
- [22] Alassane COULIBALY ; (2009) ; Thèse de doctorat sous le titre : Approvisionnement, consommation de l'eau potable et assainissement en commune I du District de Bamako : le cas de Bankoni et de Djélibougou ; République du Mali ; Université de Bamako ; Faculté de Médecine de Pharmacie et d'Odontostomatologie ;
- [23] IGNOURET (M.) ; L'eau un droit universel ? Journal Intelligent (17/02/04)
http://www.lintelligent.com/gabarits/articleJAI_online.asp?art_cie=ILIN08024leauulesrev0 ;
- [24] ERE URBAINE, 1999 ; Faut-il payer l'eau ? Et si oui, Comment ? Le Magazine Mondiale de l'information, pp 16-34 ;
- [25] Nabih ZERKI ; (2013) ; Thèse de doctorat sous le titre : Apport de la chimie pour l'analyse et l'interprétation de quelques paramètres physico-chimiques influençant la répartition des métaux lourds, des éléments nutritifs et des anions dans les eaux de l'oued de Bouregreg ; Université Mohammed V-Agdal Faculté Des Sciences Rabat ;
- [26] Gold C., (2002). «Etude des effets de la pollution métallique (Cd/Zn) sur la structure des communautés de diatomées périphytiques des cours d'eau, Approches expérimentales in situ et en laboratoire», Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I ;
- [27] James, E. and M. Joyce (2004). "Assessment and Management of Watershed Microbial Contaminants." Critical Reviews in Environmental Science and Technology 34(2): 109-139 ;
- [28] Stirling, R., J. J. Aramini, A. Ellis, G. Lim, R. Meyers, M. Fleury and D. Werker (2001). "Écllosion De Cryptosporidiose D'origine Hydrique, North Battleford (Saskatchewan), Printemps 2001." Relevé des maladies transmissibles au Canada 27(22): 185-192 ;
- [29] Mackenzie, W. R., N. J. Hoxie, M. E. Proctor, M. S. Gradus, K. A. Blair, D. E. Peterson, J. J. Kazmierczak, D. G. Addiss, K. R. Fox, Rose, J. B. and J. P. Davis (1994). "A Massive Outbreak in Milwaukee of Cryptosporidium Infection Transmitted through the Public Water Supply." N. Engl. J. Med. 331(3): 161-167 ;
- [30] Hrudefy, S. E., P. M. Huck, P. Payment, R. W. Gillham and E. J. Hrudefy (2002). "Walkerton: Lessons Learned in Comparison with Waterborne Outbreaks in the Developed World." Journal of Environmental Engineering and Science 1(6): 397-407 ;
- [31] JALLIFFIER-VERNE Isabelle ; (2015) ; Thèse de doctorat sous le titre : Débordements d'égouts unitaires et protection des sources d'eau potable: intégration des changements globaux ; Université De Montréal, École Polytechnique De Montréal ;
- [32] Tabet D.H., (1999) : Intérêt d'une approche spatiale par suivi de la salinité des sols dans les systèmes irrigués. Cas de la subdivision de Panjab (Pakistan). Thèse Doctorat ENGREF, Montpellier. 435p ;
- [33] Salwa Belaquiz ; (2014), Une approche d'aide à la décision pour la gestion d'un système d'irrigation gravitaire : modélisation multi-agents, télédétection et optimisation par algorithme évolutionnaire ; Thèse de doctorat, Université Cadi Ayyad, Faculté Des Sciences Et Techniques-Marrakech ;
- [34] Chehbouni, A., Escadafal, R., Boulet, G., Duchemin, B., Simonneaux, V., Dedieu, G., Mougenot, B., Khabba, S., Kharrou, H., Merlin, O., Chaponnière, A., Ezzahar, J., Er-raki, S., Hoedjes, J., Hadria, R., Abourida, H., Cheggour, A., Raibi, F., Boudhar, A., Hanich, L., Guemouria, N., chehbouni, A., Oliosio, A., Jacob, F. and Sobrino, J., 2008. An integrated modelling and remote sensing approach for hydrological study in semi-arid regions: the SUDMED Program. International Journal of Remote Sensing. 29:5161-5181 ;
- [35] Plan Bleu, 2009. Etat de L'environnement et du Développement en Méditerranée, Rapport d'activités régionales PNUD/PAM, page 208 ;
- [36] Marlet S. (2004). Evolution des systèmes d'irrigation et gestion de la salinité des terres irriguées. Acte du séminaire « Modernisation de l'Agriculture Irriguée », Rabat, du 19 au 23 avril 2004 ;
- [37] FAO, (2014). La situation de l'alimentation et de l'agriculture 2014, résumé: www.fao.org/3/a-i4036f.pdf ;
- [38] Singh, A., (2013). Groundwater modelling for the assessment of water management alternatives. J. Hydrol. 481, 220-229 ;

- [39] Abdelhamid BRADAI, (2017) ; Evolution de la qualité géochimique des eaux souterraines utilisées dans l'irrigation et leur impact sur la dégradation des sols de la plaine du bas- chélif ; Thèse de doctorat, Université Hassiba Benbouali de Chlef, Faculté de Génie Civil et d'Architecture ;
- [40] Valles, V. N'Diaye M.K., Bernadac A. et Tardy Y.,(1989). Mali. Al, Si and Mg in water concentrated by evaporation: development of a model. *Arid Soil Res. Rehabil.*3, pp 21–39 ;
- [41] Cheverry C. (1974). Contribution à l'étude pédologique des polders du lac Tchad. Dynamique des sels en milieu continental subaride dans les sédiments argileux et organiques. Thèse. Science, U.L.P. Strasbourg, 257 p ;
- [42] Al Droubi A., (1976). Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. PhD Thesis, University of Strasbourg ;
- [43] Barbiéro L. et Valles V. (1992). Aspects géochimiques de l'alcalinisation des sols dans la vallée du Dallol Bosso (République du Niger). *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXVII, no 2, 1992 : 143-152 ;
- [44] Barbiéro L., Valles V. et Régeard A., (1995) : Contribution de la fluorine au contrôle géochimique du calcium sur un bas fond sahélien du Niger. Conséquences pour une estimation quantitative de l'évolution des sols. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris* 321, série II, pp. 1147–1154 ;
- [45] N'diaye M. K., (1987): Evaluation de la fertilité des sols de l'office du Niger (Mali). *Traité d'irrigation*, seconde édition. Tec & Doc Lavoisier. pp.797 – 822 ;
- [46] Loyer, J.Y. (1989). Les sols sales de la basse vallée du fleuve Sénégal. Caractérisation, distribution et évolution sous cultures. Ed. et Th. ORSTOM, Paris ;
- [47] Derbbah A. et Badraoui M. (2003). Irrigation et environnement au Maroc : Situation actuelle et perspectives. In S. Marlet, P. Ruelle (eds), *Vers une maîtrise des impacts environnementaux de l'irrigation*. Cédérom du CIRAD, Montpellier, France ;
- [48] Ben Abbou M., Fadil F., El Hadj M. (2014). Évaluation de la qualité des cours d'eau de la ville de Taza utilisés dans l'irrigation des cultures maraichères, Maroc. *Journal of Applied Biosciences* 77:6462– 6473 ;
- [49] Douaoui A. et Hartani. T., (2007). Impact de l'irrigation par les eaux souterraines sur la dégradation des sols de la plaine du Bas-Chélif. Actes de l'atelier régional SIRMA. Tunis, Juin 2007 ;
- [50] Bouhlassa S., Alechcheikh C. et Kabiri L. (2008). Origine de la minéralisation et de la détérioration de la qualité des eaux souterraines de la nappe phréatique du Quaternaire du bassin-versant de Rheris (Errachidia, Maroc). *Sécheresse*, vol. 19, n° 1, p. 67-75 ;
- [51] Rouabhia A.E.K. et Djabri L., (2010). L'irrigation et le risque de pollution saline. Exemple des eaux souterraines de l'aquifère miocène de la plaine d'El Ma Labiod. *Larhyss Journal* (<http://larhyss.net/journal.html>), n° 8, p. 55-67 ;
- [52] Gouaidia L., Guefaïfia O., Boudoukha A., LaidHemila M. et Martin C.,(2012). Évaluation de la salinité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols : exemple de la plaine de Meskiana (Nord-Est Algérien). *J. Géographie physique et environnement*, Vol.6. 141-160 ;
- [53] Bassel HAJ NAJIB, (2007) ; Gestion optimale de l'utilisation de l'eau douce et salée pour l'irrigation du coton dans le bassin de l'Euphrate en zone semi-aride ; Thèse de doctorat, Université Des Sciences Et Technologies De Lille ;
- [54] Richards, L.A., (1954). Diagnosis and improvements of saline and alkali soils. U.S.Salinity Laboratory DA, US Dept. Agr. Hbk 60, 160 p ;
- [55] Harivandi A., (1999):Interpriting turfgrass irrigation Water test result. *Water journal of California*, Publication 8009 University of California, Divisionof agriculture and natural resources. 9p ;
- [56] Glover C.R., (1996). *Irrigation Water Classification Systems (Guide a-116)*. New Mexico State University is an equal opportunity/affirmative action employer and educator. NMSU and the U.S. Department of Agriculture. 4p ;
- [57] Richards, L.A. (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. USDA Agricultural Handbook 60, Washington, 160 p ;
- [58] Durand J.H., 1982. Les sols irrigables : étude pédologique. 399 p ;
- [59] Ayers R.S et Westcot D.W, (1988) : La qualité de l'eau en irrigation. *Bulletin de la FAO d'irrigation et de drainage*.29Rév. 1, 165p ;

- [60] FAO, (1996). La qualité d'eau dans l'irrigation, Bulletin n°29 de l'Organisation Mondiale pour l'Alimentation et l'Agriculture ;
- [61] <https://www.lenntech.fr/applications/potable/normes/normes-oms-eau-potable.htm> ;
- [62] Norme Marocaine NM 03.7.001 (2006) ; Qualité des eaux d'alimentation humaine ; Elaborée par le comité technique de normalisation des eaux d'alimentation humaine Editée et diffusée par le Service de Normalisation Industrielle Marocaine (SNIMA) ; Accordé sous licence par l'IMANOR à OCP SA Facture N°2017FA00650 du 2017-09-07 ;
- [63] Asano T, Levine AD (1998). Wastewater reclamation, recycling, and reuse: an introduction. In: Asano T, ed. Wastewater reclamation and reuse. Lancaster, PA, Technomic Publishing Company, pp. 1–56 ;
- [64] Ayers RS, Westcot DW (1985). Water quality for agriculture. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO Irrigation and Drainage Paper 29, Revision 1 ; <http://www.fao.org/docrep/003/T0234E/T0234E00.htm>);
- [65] Pescod MB (1992). Wastewater treatment and use in agriculture. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO Irrigation and Drainage Paper 47) ;
- [66] Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, chargé de l'Eau et de l'Environnement ; Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (2007) ; Normes de qualité des eaux d'irrigation ;
- [67] Etude d'actualisation du PDAIRE de la zone d'action de l'Agence de l'OER Novembre 2008 ;
- [68] Projet de Plan Directeur d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau du Bassin de l'Oum Er-Rbia et des bassins côtiers atlantiques ; Rapport de présentation ; Octobre 2012 ;
- [69] Monographie de la région Béni Mellal Khenifra 2014-2015 ;
- [70] OUSTOU Bari ; Etude perspective de l'impact de la reconversion de l'irrigation gravitaire à l'irrigation localisé sur les ressources en eau souterraines au périmètre irrigué de Tadla ; Projet de Fin d'Etudes présenté pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur en Génie Rural ; Juillet 2015 ;
- [71] <http://pravarini.free.fr/Generalites2.htm> ;
- [72] <http://lyc-ferry-conflans.ac-versailles.fr/~lyonnetj/SVT/MISVT/2nde3-09-10/Th6-DD/Site-Laura-Chahrazed/2definition-pollution.html> ;
- [73] Loi 12.01 relative à la protection et à la mise en valeur de l'environnement, 2003 ;
- [74] Directive 2000/60/CE, 2000 ;
- [75] AFNOR, 1994. Lexique français-anglais, anglais-français. Paris La Défense ;
- [76] Gaujout D. 1995. La pollution des milieux aquatiques. Aide-mémoire, 2ème édition TEC et DOC. Paris.520p. ;
- [77] Bensouilah S.1995. Contribution à l'étude hydrogéologique des Hautes Plaines sétifiennes dans le cadre de la haute vallée de l'Oued Rhumel en amont d'Oued Athmania, Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, Faculté des sciences de la terre, de la géographie et de l'aménagement du territoire, Département de la géologie, 247p ;
- [78] <http://www.agrimaroc.ma/agricole-beni-mellal-khenifra/> ;
- [79] CACG / ADI Etude d'actualisation du PDAIRE de la zone d'action de l'Agence de l'OER Novembre 2008 ;
- [80] H. Berdar, B. Soudi et A. Bellouti, Rabat, du 19 au 23 avril 2004 ; Contribution à l'étude de la pollution nitrique des eaux souterraines en zones irriguées : Cas du Tadla, Actes du séminaire « Modernisation de l'Agriculture Irriguée, Projet INCO-WADEMED ;
- [81] http://www.eaufrance.fr/3/s-informer/comprendre/les-risques-lies-a-leau/?id_article=727 ;
- [82] Abdellah Elazhari 2012/2013 ; Etude de la contamination par les éléments traces métalliques des sédiments de l'oued Moulouya et de la retenue du barrage Hassan II en aval de la mine abandonnée Zeïda, Haute Moulouya, Mémoire de Stage de Fin d'Etudes ;
- [83] BOUABDLI A., M'RABET S., ESCARRE S. et LEBLANC M. 2005. Heavy metals transport by the Moulouya river (Morocco), revue science de l'eau, rev. Sci. Eau 18/2, 199-213 ;
- [84] Dahir n° 1-95-154 du 18 rabii I 1416 (16 août 1995) portant promulgation de la loi n° 10-95 sur l'eau ; Bulletin officiel n° 4325 du 24 rabii 1416 (20 septembre 1995) ;
- [85] LADLANI. I.2007 Contribution à la gestion optimale de la ressource en eau mobilisée «choix de formule empirique pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle "ETP" dans les régions de Tébessa et Annaba» mémoire magister université de BATNA ;

- [86] Meybeck M., 1982, Carbon, nitrogen and phosphorus transport by world rivers. *Amer. J. Sci.*,282, 401-450 ;
- [87] Meybeck M., 1989, the quality of rivers: from pristine stage to global pollution. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol.*, 75, 283-309 ;
- [88]<https://www.aquaportail.com/definition-3927-cycle-de-l-azote.html> ;
- [89] Direction générale de la santé (DGS). L'eau potable en France, 2002-2004. Guide technique Eau et santé, juil. 2005, 53p. Disponible sur <<http://www.sante.gouv.fr/>> (consulté en oct. 2005) ;
- [90]<http://informations-documents.com/environnement.ecole/d%27ou%20proviennent%20les%20nitrates.htm> ;
- [91] Zmirou D., Bard D., Dab W. et al. Quels risques pour notre santé ? Syros, 2000, 335p ;
- [92] Momas I., Caillard J.F., Lesaffre B. Plan National Santé Environnement. Rapport de la Commission d'Orientation. La Documentation Française, 2004, 296p ;
- [93] Testud F., 2004, Engrais minéraux. *Toxicol. Pathol.* 1, 21-28. Magee P. N., Barnes J. M., 1967, Carcinogenic nitroso compounds, *Adv. Cancer Res.*, 10,163-169 ;
- [94] Vilaginès R. Eau, Environnement et santé publique. Introduction à l'hydrologie. Éditions Tec & Doc, 2003, 2ème éd., 109p ;
- [95] Les nitrates et l'homme. Le mythe de leur toxicité. Par le professeur Jean L'hirondel et le docteur Jean-Louis L'hirondel. Les éditions de l'environnement.1996 ;
- [96] COLLEEN S BRUNING-FANN DVM APD JOHN B KANEENE DVM, MPH, RHD. 1993. The effect of nitrate, nitrite and N-nitroso compounds on human health. Review. *Veterinary and Human Toxicology*, Vol. 35, N° 5, pp: 521-538;
- [97] COIN L., ERB F. 1981. Toxicologie des dérivés azotés dans l'eau. 4ème journées scientifiques et techniques. L'eau, la recherche et l'environnement, Paris ;
- [98] PRATT P.F., JURY W.A. 1984. Pollution of Un saturated zone with nitrate, in Yaron B. and Dagan. G (ed) *Pollutants in porous media*. Pp.52-67. *ecological studies vol. 47*;
- [99] L'hirondel J., L'hirondel J. L., 2002, Nitrate and Man: Toxic, Harmless or Beneficial? CABI Publishing, New York, 168 pp ;
- [100] LANDREAU A. 1990. La pollution des eaux par les nitrates. *Revue Eau et Développement*, N°10. Décembre, pp: 49-58 ;
- [101] MIRVISH S.S. 1977. N-nitroso compound, nitrite and nitrate: Possible implications for the causation of human cancer. *Prog. Water technol.* 8, pp: 19-207;
- [102] HARTMANN P.E. 1983. Putative mutagens/carcinogens in food. In Nitrate: nitrite Ingestion and gastric cancer Mortality. *Environ. Mutagens* 5, pp: 111-121;
- [103] LEEMANS-SANDERSON S., 1996. Impact de l'utilisation des nitrates en agriculture sur les aliments ET les eaux de consommation. Syllabus de la formation continues en ingénierie des sciences naturelles «Qualité des aliments et Santé ». ASBL Comité Nitrates. Gembloux Belgique;
- [104] WHO, 1995, Concern for Europe's Tomorrow, Health and the environment in the WHO European region. World Health Organization (WHO), Rapport WHO European Centre for Environment and Health, Stuttgart, 537 pp ;
- [105] Cantor K. P., 1997, Drinking water and cancer. *Cancer Cause Control* 8, 292-308 ;
- [106] Gulis G., Czompolyova M., Cerhanw J. R., 2001, An Ecologic Study of Nitrate in Municipal Drinking Water and Cancer: Incidence in Trnava District, Slovakia. *Environ. Res. Section A*, 88, 182-187 ;
- [107] CIPEL (2015) Rapport Eaux du Léman – Campagne 2014, 261p ; Jacquet S. et al (2013) Suivi environnemental des eaux du lac du Bourget pour l'année 2012. Rapport INRA, CISALB, CALB, 226p ;
- [108] H. BERDAI , B. SOUDI et A. BELLOUTI, Contribution a l'etude de la pollution nitrique des eaux souterraines en zones irriguees : cas du Tadla, *Revue H.T.E.* N° 128 - Mars 2004 ;
- [109] Hanane EL-HALOUANI, Zehor AIT YACINE, et Abdelaziz HASIB; 2017; Study of the groundwater quality in the irrigated plain of Tadla, *Journal of Materials and Environmental Sciences* ISSN : 2028-2508;
- [110] SOUDI B. 2002. Etude de l'impact de l'intensification agricole sur la qualité des sols et des eaux dans le périmètre irrigué des Doukkala. Acte de séminaire.4p;

- [111] FETOUANI S. 2005. Etude de l'impact de la pollution agricole diffuse sur la qualité des eaux souterraines de la plaine des Triffas. Mémoire de 3ème cycle. Spécialité : Sciences de l'environnement. Université Mohammed premier. Oujda. Maroc.115p ;
- [112] FETOUANI S. 2012. Contribution à l'étude de l'impact de l'intensification agricole sur la qualité des eaux souterraines et des sols au niveau d'une exploitation agricole au centre de la plaine des Triffa. Thèse de Doctorat 3ème cycle. Spécialité : Sciences de l'environnement. Université Mohammed premier. Oujda. Maroc.202p ;
- [113] KHERRATI I., DAIFI H., EL KHARIM K., BELGHYTI D. ALEMAD A., KHADMAOUI A., DLIMI L., LHOUSSIN F. 2015. Evaluation de la qualité physico chimique et bactériologique de la nappe Maâmora (Kenitra-Maroc). Science Lib Editions Mersenne: Volume 6, N°140902 ISSN2111-4706 ;
- [114] IDRISSE ALAMI I., ZERAOULI M., ADDOU, M., MOKHTARI A., SOULAYMANI A. 2007. Évaluation de la pollution nitrique de la nappe phréatique de la zone côtière du Gharb (M'nasra) au Maroc entre 1993 et 2003. Afr. Sci. 03, 378 – 390 ;
- [115] Franck Tison, J-Claude Gaudu, Rene Pallut, Stephane Ruy, Claude Doussan, et al.. Mesure de débit sur un lysimètre en milieu agricole à sol non remanié. Cahier des Techniques de l'INRA, INRA, 2016, chap1-ns-J2M (2016) (Numéro Spécial Mesures et Métrologie) ;
- [116] Bogner C, Marc V, Di Pietro L, Doussan C, Ruy S, Gaudu JC, Perrin P, Cognard-Plancq AL, Emblanch C, Daniel M, Simler R (2004) Tracer study of infiltration in a field soil - simulated rainfall experiment on a large lysimeter. International Workshop on the Application of Isotope Techniques in Hydrological and Environmental Studies: 6-8 November 2004; Paris ;
- [117] Garel E, Marc V, Ruy S, Doussan C, Simler R, Daniel M, Tison F (2007) Infiltration processes and impact on shallow groundwater in agricultural dry land areas. International Symposium on Advances in Isotope Hydrology and its role in Sustainable Water Resources Management, (IHS-2007), May 2007, Vienne ;
- [118] Chapelet A, Debroux M, Tison F, Di Pietro L, Doussan C, Joelson M, Marc V, Ruy S (2012) An experimental set up in Avignon (South of France) for the multiscale study of preferential flow in soil and of groundwater recharge processes; Colloque EuroSoil 2012, Bari, 2-6 juillet, (p. 1901) ;
- [119] A. Aboukhaled ; Martin Smith 1986 ; les lysimètres ; Organisation Des Nations Unies Pour L'alimentation Et L'agriculture (FAO) ; ISBN 92-5-201186-2 ;
- [120] Fonder N., Vandenberghe C., Xanthoulis D., Marcoen J.M. 2005 Suivi lysimétrique de la lixiviation de l'azote nitrique dans le cadre du Programme de Gestion Durable de l'Azote en agriculture. Rapport final. Convention Région wallonne DGA n°3523/1. Période du 1^{er} mars 2003 au 28 février 2005. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux. Belgique. 106p ;
- [121] Castany G. (1967). Traité pratique des eaux souterraines. Dunod, Paris,. p.148-173 ;
- [122] Lanthaler, C. (2004) 'Lysimeter Stations and Soil Hydrology Measuring Sites in Europe - Purpose, Equipment, Research Results, Future Developments.', Dipl.Thesis Mag. rer. nat., School of Natural Sciences, Karl-Franzens-University Graz ;
- [123]http://atlashydrologique.ch/downloads/01/content/Text_Tafel66.fr.pdf ;
- [124]http://atlashydrologique.ch/downloads/01/content/Text_Tafel63.fr.pdf ;
- [125]http://www.ecosociosystemes.fr/bilan_hydrique_hydrologique.html ;
- [126]Leparisien Dictionnaire; <http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Lysim%C3%A8tre/fr-fr/>;
- [127] Zoller, I. 1994 : Non-ionic surfactants in reused water : are actived sludge/soil aquifer treatments sufficient. Wat. Res. 28 (7), pp : 1625-1629 ;
- [128] Soudi, B. ;1995 . Mise en place des réseaux de suivi de la nappe phréatique et de la qualité des sols et des eaux du périmètre de Tadla Rapport M.R.T N° 608-0213-3-20014 ; [129] Suzuki, T., Takao Katsuno et Gentaro Yamaura.;1992. Land application of wastewater using three types of trenches setin lysimètres and is Mass Balance of nitrogen. Wat. Res., 11 (26) pp : 1433-1444 ;
- [130] Lydia, N. 2010. –Mise au point d'une technique d'extraction des éléments traces métalliques dans les produits de la mer et leurs dosages par spectrophotométrie d'absorption atomique. Magister en médecine vétérinaire, Univ. Mentouri de Constantine, Fac. Sci., Algérie, 103 p ;
- [131] Callender, E. 2003. Heavy Metals in the Environment-Historical Trends. US Geological Survey, Westerly, RI, USA, pp. 67-100 ;

- [132] Ghali S., (2008). Étude de la carbonisation d'un précurseur végétal, les noyaux d'olives. Utilisations dans le traitement des eaux. Mémoire de Magister. République Algérienne démocratique et populaire Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique. Université de 20 août 55-SKIKDA ;
- [133] Bourrinet P., Ramade F., Remond-Gouilloud M., (2008). Pollution. cbhg.org/wp-content/uploads/2008/06/pollution-eu.pdf ;
- [134] Baize, D. 1997. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Editions Quae, 408 pages ;
- [135] Katerine Lamprea. Caractérisation et origine des métaux traces, hydrocarbures aromatiques polycycliques et pesticides transportés par les retombées atmosphériques et les eaux de ruissellement dans les bassins versants séparatifs péri-urbains.. Ingénierie de l'environnement. Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2009. Français. <tel-01002809> ;
- [136] MIQUEL G., 2001. Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. Rapport Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (Dir.). Rapport Sénat n°261: 360 ;
- [137] Boucheseiche C., Crémille E., Pelte T., Pojer K., (2002). Pollution toxique et écotoxicologie : Notions de base. Guide technique n°7 du SDAGE Rhône-Méditerranée-Corse, 83p ;
- [138] Dina Baghdadi Mazini (2012) Pollution de l'environnement marin et santé humaine: Mesure, évaluation et Impact des contaminants chimiques et biologiques dans les produits de la pêche au niveau du littoral marocain ; Thèse de doctorat, Université Abdelmalek Essaadi Faculte Des Sciences Et Techniques – Tanger ;
- [139] CHIFFOLEAU J.F., CLAISSE D., COSSA D., FICHT A., GANZALEZ J.L., GUYOT T., MICHEL P. MIRAMAND P., OGER C., PETIT F. 2001. La contamination métallique, Ifremer, 39p ;
- [140] Emmanuel DOELSCH ; (2004) ; Eléments Traces Métalliques ; Inventaire Pour L'île De La Réunion (Sols, Déchets Et Végétaux), Avril 2004 ;
- [141] Garret, G. G. 2000. Natural sources of metals to the environment: Human & Ecological Risk Assessment. In: Blanquet, J.P., Bonnomet, V., Coquery, M., Gaudillot, A., Gondelle, F., Houeix, N., LE Goff, F., Magaud, H., Meunier, L., Sanchez, W.-Devenir et comportement des métaux dans l'eau : biodisponibilité et modèles BLM, Rapport technique , INERIS, Paris, France, 2004 , 85 p ;
- [142] BINEY CH., AMAZU A.T., CALAMARI D., KABA N., MBOME I.L., NAEVE H., CHUMBA O., OSIBANJO O., RADEGONDE V., MASSAD A.H.S. 1991. Etude des métaux lourds présents dans l'environnement aquatique africain. Rapport de la troisième session du groupe de travail sur la pollution et les pêches Accra, Ghana, 25-29, novembre 1991 ;
- [143] Sirven J-B., (2006). Détection de métaux lourds dans les sols par spectroscopie d'émission sur plasma induit par laser (LIBS) N°d'ordre : 3219 Thèse d'Université Bordeaux 1 ;
- [144] RAMADE F. 1992. Précis d'écotoxicologie. Paris: Ed Masson : 300 ;
- [145] Chaney RL, Malik M, Li YM, Brown SL, Brewer EP, Angle S, Baker AJM. 1997. Phytoremediation of soil metals. Curr. Opin. Biotechnol. 8 : 279-284 ;
- [146] Kumar PBAN, Dushenkov V» Motto H» Raskin I. 1995. Phytoremediation : the use of plant to remove heavy metals from soil. Environ. Sci. Technol. 29 : 1232-1238 ;
- [147] Salt DA, Blaylock M, Kumar NPBA, Dushenkov V, Ensley B, Chet I, and Raskin I. 1995. Phytoremediation: a novel strategy for thr removal of toxic metals from the environment using plants. Biological Technology 13 : 468-474 ;
- [148] Belouchrani ;as , .Abdi ;n , Lounici ;h , Mameri,n (2014) ; Etude expérimentale de la phytoremédiation dans la restauration d'un sol pollué par les métaux lourds (cas du zinc) ; Ecole Nationale Supérieure Agronomique (ENSA), Sciences des sols, Alger, Algérie ;
- [149] Franck REPELLIM (2000) ; La phytoremédiation des sols pollués par les métaux lourds, Ecole Nationale Supérieure des Sciences de l'Information et des Bibliothèques, Université Claude Bernard Lyon 1 ;
- [150] Armelle Braud. Procédé de phytoextraction couplé à la bioaugmentation d'un sol agricole polycontaminé par du chrome, du mercure et du plomb. Interactions entre organismes. Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2007. Français. <tel-00465806> ;
- [151] EPA (2000) Introduction to phytoremediation. Environmental Protection Agency. EPA/600/R-99/107 ;

- [152] Rattan R.K., Datta S.P., Chhonkar P.K., Suribabu K., Singh A.K. (2005), Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater—a case study. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 109, 310–322 ;
- [153] <http://www.atsdr.cdc.gov>;
- [154] ALLOWAY B.J. & AYRES D.C. 1997. *Chemical Principles of Environmental Pollution*. Blackie Academic and Professional, an imprint of Chapman and Hall. London, 394p ;
- [155] M. Jean HUSS, (2011); *Les risques sanitaires des métaux lourds* ; Luxembourg, Groupe socialiste ;
- [156] Peter Jennrich, *Schwermetalle – Ursache für Zivilisationskrankheiten [Les métaux lourds – cause de maladies de civilisation]*, Editions Co' med, Hochheim 2007.
- [157] Direction Régionale De L'agriculture Béni Mellal Kheinfra ; *Monographie De La Region Béni Mellal Khénifra (2014-2015)* ;
- [158] Massoni et Missante, (1967). *Les cahiers de la recherche agronomique, n°24; congrès de pédologie méditerranéenne. 1966. Madrid. Excursion au Maroc. I.I 2 ème partie ; Description des régions traversées, chap II, pp 163-194 ;*
- [159] Saadi, E. (1982). *Schéma structural du Maroc. Notes et Mém.serv.géol.Maroc, n° 278 Bis ;*
- [160] Michard, A. (1976). *Éléments de géologie marocaine. Notes et mémoires, ser.géol. Maroc. Rabat, n°252, pp.408 ;*
- [161] Salahddine DIDI ; thèse intitulée *Contribution à la reconnaissance structurale et hydrogéophysique de la zone Nord-Est du bassin sédimentaire du Tadla et étude de la vulnérabilité à la pollution intrinsèque de son système aquifère ; Béni Mellal 2018 ;*
- [162] Choubert, G., et Faure Muret, A. (1960-1962). *Evolution du domaine atlasique marocain depuis les temps paléozoïques*, in « livre à la mémoire du Professeur Paul Fallot » M.h.Serv.Soc.géol.fr.t.l, pp : 447-527 ;
- [163] Archambault, C., Combe, M., et Ruhard, J.P. (1975). *Plateau des Phosphates*, in « Ressources en Eau du Maroc », tome 2, Plaines et Bassins du Maroc Atlantique. Notes et mém. serv. Géol. Maroc, n° 231 /2, Rabat, pp.239-259 ;
- [164] Hsissou, Y. (1991). *L'aquifère des calcaires du Turonien (Bassin du Tadla, Maroc). Alimentations locales et lointaines à partir de l'Atlas. Thèse de Doctorat, Terre, Océan, Espace, Univ de Besançon. 180p ;*
- [165] Aude Nuscia, T. (2015). *Atlas régional région du Tadla Azilal Maroc*. Récupéré de : <https://rechercheisidore.fr/search/resource/?uri=10670/1.ni44mu> ;
- [166] ABHOER. (2012). *Etude de la recharge artificielle des nappes profondes du Tadla ; Mission I, ANZAR ;*
- [167] Tammal, M. et al. (2014). *Modélisation multicouche du système aquifère du bassin de Tadla et le plateau des phosphates*, *International Journal of Innovation and Scientific Research* ISSN 2351-8014 Vol. 6 No. pp. 172-180 ;
- [168] Hammani, A., Kuper, M., Debbarh, A., Bouarfa, S., Badraoui, M., Belloouti, A. (2004). *Evolution de l'exploitation des eaux souterraines dans le périmètre irrigué du Tadla*. *Hommes La Terre L'eau*, 536, 10-43 ;
- [169] Faouzi, M. et Larabi, A. (2010). *Problématique de la remontée de la salinité et de la pollution par les nitrates des eaux de la nappe phréatique des Beni-Amir (Tadla. Maroc)* *Ingénieries*, 27, 23-36 ;
- [170] Massoni C., Missante G., 1966. *Dissertation des régions transversales chapitre II : la plaine du Tadla Les cahiers de la recherche agronomique N° 24, congrès de pédologie méditerranéenne 1966 ;*
- [171] Arioua, A. et al. (2007). *Corrélation entre paramètres hydrogéochimique et géoléctrique pour évaluation de la qualité des eaux de la nappe phréatique de la plaine du Tadla – Maroc*. *Geomaghreb*, 4, 113-117 ;
- [172] ABHOER. (2008). *Etude d'actualisation du plan directeur d'aménagement intègre des ressources en eau (pdare) de la zone d'action de l'agence du bassin hydraulique de l'oum er rbia, Mission I.3 – Actualisation de l'évaluation des ressources en eau et de leur qualité. pp 182 ;*
- [173] Lbouh, H. (2016). *Apport de la télédétection dans l'évaluation de la variation des surfaces d'eau, du sol et du couvert végétal dans la Plaine du Tadla entre 5981 et 0651 ;*
- [174] Ettazarini, S. (2006). *Groundwater Pollution Risk Mapping for the Eocene Aquifer of the Oum Er-Rabia Basin, Morocco*. *Environmental Geology*, 51, 341-347 ;

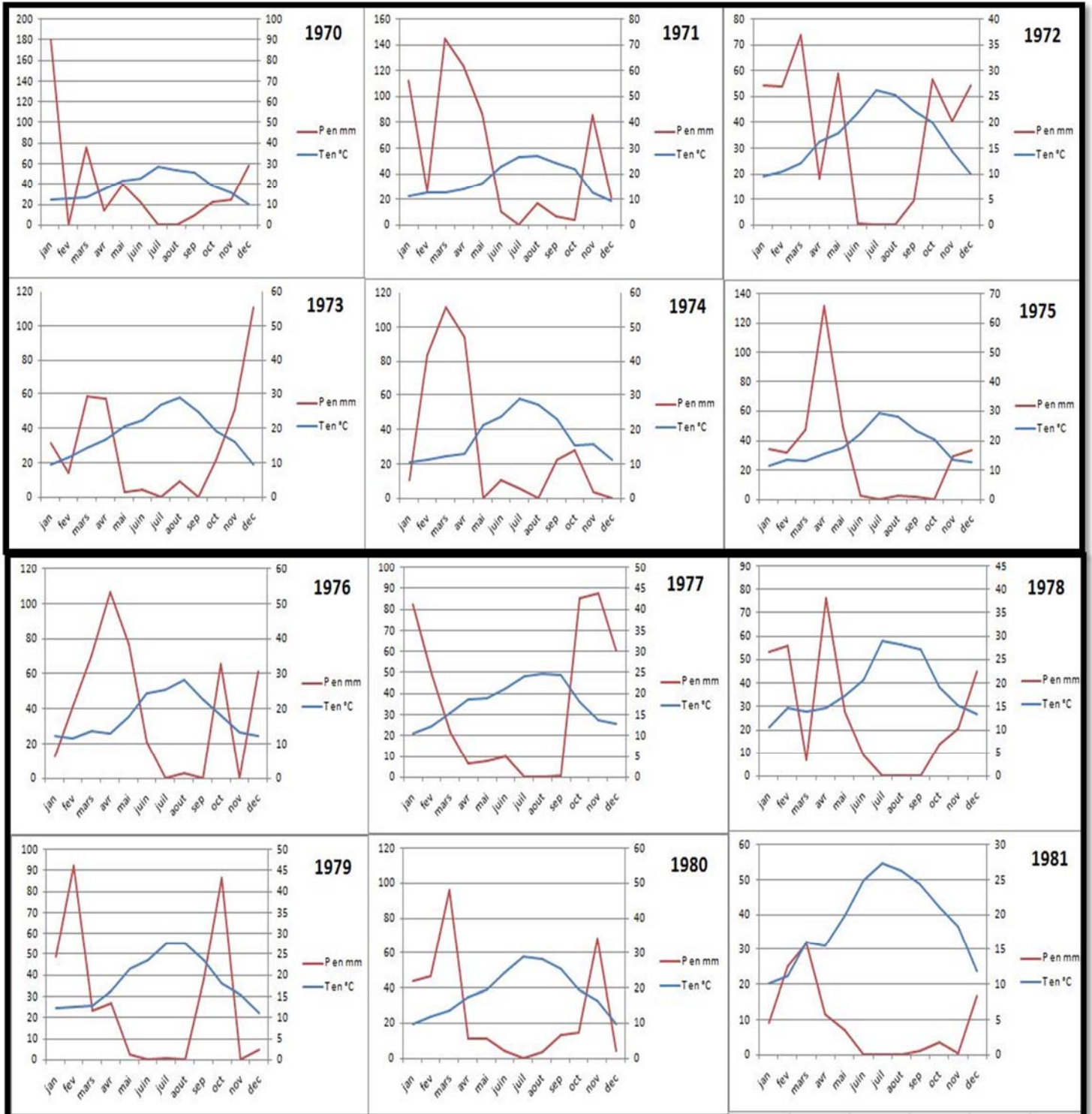
- [175] Hsissou, Y., Chauve, P. et Mania, J. (1996). L'aquifère des calcaires du Turonien (Bassin du Tadla. Maroc). Alimentations locales et lointaines à partir de l'Atlas. *Journal of Hydrology*, 183(3-4), 433-44 ;
- [176] Hsissou, Y., Chauve, P., Mania, J., Mangin, A., Bakalowicz, M. et Gaiz, A. (1996). Characterization of the groundwaters of the Turonian catchment of Tadla (Morocco) by the concentration ratios of Sr²⁺/Ca²⁺. *Journal of Hydrology*, 183(3-4). 445-451 ;
- [177] Zarhloule, Y & al. (2001). La prospection géothermique de surface au Maroc : hydrodynamisme, anomalies thermiques et indices de surface. *Journal of African Earth Sciences*, 32(4), 651-667 ;
- [178] Boukdir, A. (1994). Contribution à l'étude géothermique du bassin du Tadla, plateau des phosphates et Tassaout aval : Application au réservoir calcaire du turonien (crétacé), Faculté des Sciences, As-Samlalia, Marrakech - DES ou DESA ;
- [179] Doorenbos, J., and Pruitt, W.O., 1977, "Guidelines for predicting crop water requirements", Irrigation and Drainage Paper 24, 2nd ed., Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 156 p.
- [180] BALLAND P., MARTIN M., CATHELAIN M., JOLY M. ET LEPIMPEC M. 1987. Mesure de la qualité : échantillonnage et analyse en laboratoire. *La houille blanche*. N° 4/5. pp355-363.
- [181] JILALI A., FAGEL N., AMAR M., ABBAS M. AND ZARHLOULE, Y. 2015B. Hydrogeochemical processes constrained by multivariate statistical methods and isotopic evidence of groundwater recharge in the aquifer of Figuig, Eastern High Atlas of Morocco. *Arabian Journal of Geosciences*: In Press.
- [182] KUMAR M., HERBERT JR R., RAMANATHAN A.L., SOMESHWAR RAO M., KIM K., DEKA J.P. AND KUMAR, B. 2013. Hydrogeochemical zonation for groundwater management in the area with diversified geological and land-use setup. *Chemie der Erde - Geochemistry*, 73(3): 267-274.
- [183] MINIVELLE, E. & SOUIAH, S. 2003. L'analyse statistique et spatiale : statistique, cartographie, télédétection, SIG, France, 284 pp.
- [184] PIRARD E. 2006. Analyse Spatial des données Géo-Environnementales. Cours. Université de Liège. (Ulg/Belgique).
- [185] World Health Organization (WHO), (1987); Factors affecting treatment in ponds In *Wastewater Stabilization pond: Principles of Planning and Practice*, FMRO Technical Publication, 10, Alexandria.
- [186] MARA D.D., SILVA S.A. & CEBALLOS B.S., (1979); Design verification for tropical oxidation ponds, *J. San. Engng. Div. Proc. Am. Soc. Civil Engrs.* 105: 151-155.
- [187] NISBET E.G. & VERNEAU O. 1970. Composantes chimiques des eaux courantes, discussion et proposition de classes en tant que bases d'interprétation des analyses chimiques. *Ann. Limn*, 6(2) : pp161-190.
- [188] MARA D. D., (1980); *Sewage treatment in hot climates*, Ed. John Wiley and Sons. 168p.
- [189] RODIER J., BAZIN C., BROUTIN J.-P., CHAMBON P. & RODI L., (1996); *Analyse de l'eau ; eaux naturelles, eaux résiduaires et eaux de mer*, 8ème édition, Dunod, Paris, 1383p.
- [190] WHO, 2000. *Global Water Supply and Sanitation Assessment 2000 report*, UNICEF, OMS, 77 pp.
- [191] WONGSASULUK P., CHOTPANTARAT S., SIRIWONG W., ROBSON M. 2013. Heavy Metal Contamination and Human Health Risk Assessment in Drinking Water From Shallow Groundwater Wells in an Agricultural Area in Ubon Ratchathani Province, Thailand. *Environ Geochem Health* 36 (1), 169-182.
- [192] BONTON A., BOUCHARD C., BARBEAU B. & JEDRZEJAK S. 2010. Comparative life cycle assessment of water treatment plants. *Desalination*, v. 284, p. 42-54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal>.
- [193] Hem JD. , *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*, USGS Water Supply Paper, 2254, 117-120(1985);
- [194] RHOADES J.D., KANDIAH A., MASHALI A.M. 1992. The use of saline waters for crop production. *Irrigation and drainage paper* 48. FAO, Rome, p.133.
- [195] SNIMA, 2006. Service de normalisation industrielle marocaine. Comité technique de normalisation des eaux d'alimentation humaine. *Qualité des eaux d'alimentation humaine*. 13PP.
- [196] OMS, 2006. *Directives de la qualité pour l'eau de boisson*, troisième édition, volume 1, recommandation, (3ème éd). Genève.

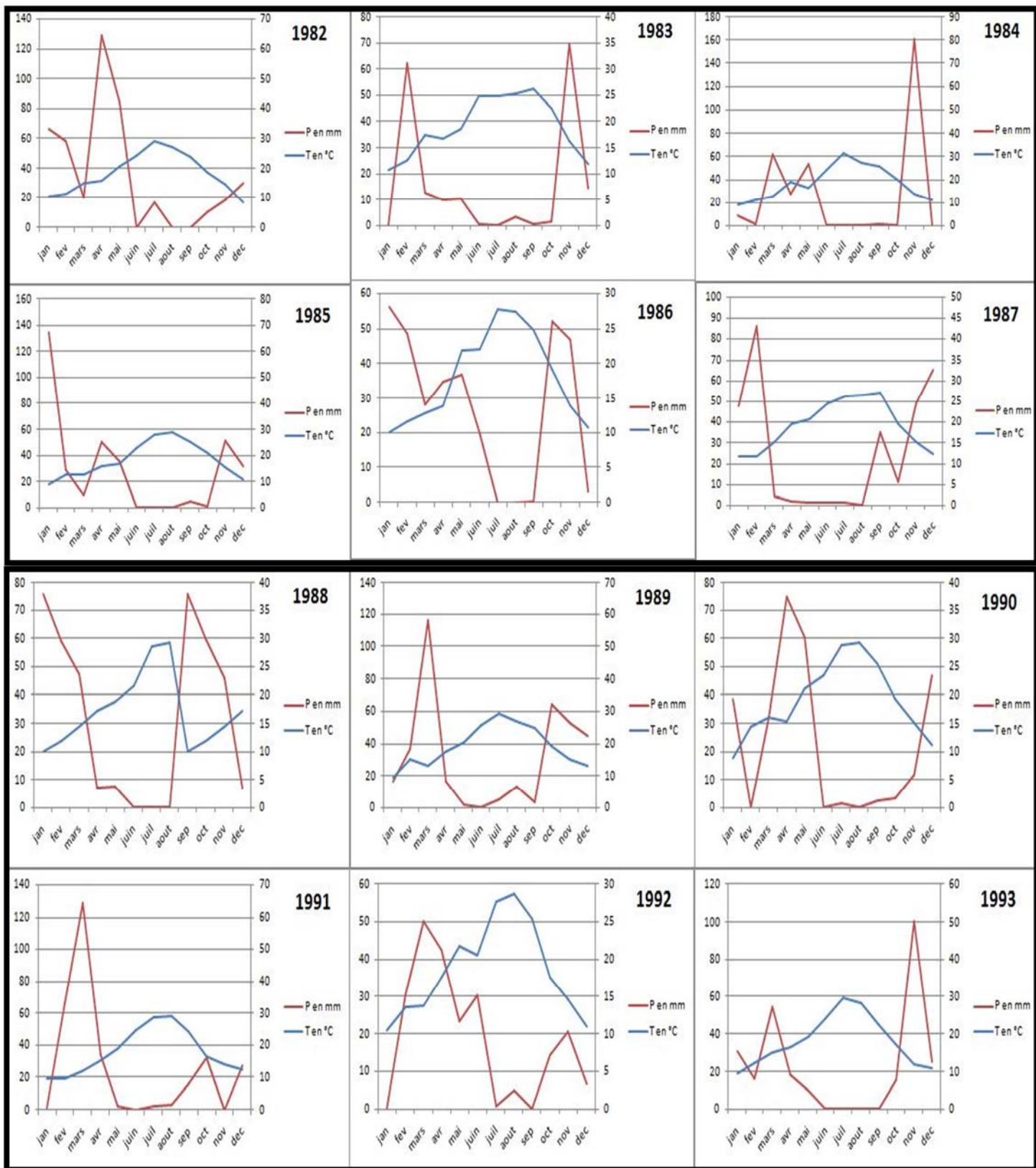
- [197]El Hammoumi, N., Sinan, M., Lekhlif, B., & El Mahjoub, L. (2012). Évaluation de la qualité des eaux souterraines pour l'utilisation dans l'eau potable et l'agriculture: plaine de Tadla, Maroc. *Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 8(1).
- [198]Rhallabi, N., Moundib, R., Maarouti, M., Marghich, M., Khallayoune, K., Bouzouba, K., ... & Touzami, M. (1990). Effets des irrigations avec des eaux usées brutes et épurées sur le sol: le rendement d'une culture de tomate et qualité hygienique de la recolte. *Acte. Inst. Agron. Vet*, 10(2), 57-66.
- [199]WEBSTER C.P., BEDFORD R.K. & CANNELLR.P. 1999. Crop uptake and leaching losses of labelled fertilizer nitrogen in relation to waterlogging of clay and sandy soils. *Plant Soil*, 92, 89-110.
- [200]Kucke, M., & Kleeberg, P. (1997). Nitrogen balance and soil nitrogen dynamics in two areas with different soil, climatic and cropping conditions. *European Journal of Agronomy*, 6(1-2), 89-100.
- [201]LECLERC H. 2008. Nitrates dans l'eau d'alimentation et risques pour la santé/Académie d'agriculture de France 72.
- [202]STEVENSON D.S. & NELSON G.H. 1990 . Nitrogen additiony and loses to drainage in orchardtype irrigated lysimeters. *Can. J. Soil sci.*70.11.19.
- [203]BENKADDOUR R., HAMMOUTI B., EL-MRABET M., DAHCHOUR A., AOUNITI A., HAOUADI B., & OUARDI A., 2004 . Salinité et pollution par les nitrates des eaux souterraines de la plaine des Triffa. *Actes Inst.Agron.Vet.(Maroc)*,Vol. 24 (3 & 4) :147-158.
- [204]BAHRI F. AND SAIBI H. 2012. Characterization, classification, bacteriological, and evaluation of groundwater from 24 wells in six departments of Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 5(6): 1449-1458.
- [205]DOUAGUI A.G., KOUAME I.K., KOFFI K., GOULA A.T.B., DIBI B., GONE D.L., COULIBALY K., SEKA A.N.M., KOUASSI A.K., OI MANGOUA J.M. & SAVANE I. 2012.Assessment of the bacteriological quality and nitrate pollution risk of Quaternary groundwater in the southern part of Abidjan District (Côte d'Ivoire). *Journal of Hydro-environment Research*, 6(3): 227-238.
- [206]LAMRANI ALAOUI H., OUFDOU K. & MEZRIOUI N. 2008. Environmental pollutions impacts on the bacteriological and physicochemical quality of suburban and rural groundwater supplies in Marrakesh area (Morocco). *Environmental Monitoring and Assessment*, 145(1-3): 195-207.
- [207]SABER M., ABDELSHAFY M., FARAGALLAH M.A. & ABD-ALLA M. 2013. Hydrochemical and bacteriological analyses of groundwater and its suitability for drinking and agricultural uses at Manfalut District, Assuit, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*: 1-21.
- [208]DESBORDES A. 2000 . Pollutions des eaux souterraines en Picardie. *Mém. Maîtrise BG, Fac. Sciences, Amiens*, 50 p.
- [209]RODIER J. 1984. *L'analyse de l'eau: eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer*. 7th ed, ISBN: 2-04-015615-1, Paris.
- [210]MATTHESS G. 1994. Geol. Mijnbouw, 53, 149. In Forstner U et Wittmann GTW *Metal pollution in the Aquatic Environment (1979)*. pp 355-359.
- [211]PESSON P. 1976. *Pollution des eaux continentales. Incidence sur les biocénoses aquatiques*. Gauthier-Villars, Paris. 285 p.
- [212]CUSTODIO E. 1983 . *Hidrologia subterranea*. Ed. Omega. 2 vol. 2350p. Barcelona, España.
- [213]RAMADE F. 1989. *Eléments d'écologie, écologie appliquée*. Masson éd. 452 p.
- [214]JEMALI A., KERFATI A. 2002. Réutilisation des eaux usées au Maroc – Ministère de l'agriculture, du développement rural et des eaux et forêts. Administration du génie rural direction du développement et de la gestion d'irrigation. 32p.
- [215]PASQUARELL G.C., BOYER D.G. 1995. Agricultural impacts on bacterial water quality in karst ground water. *J. Environ. Qual.* 24, 959-969.
- [216]Soudi B. et al., 2005. Gestion agro-environnementale del'azote apportée par les eaux usées épurées : applicationdu modèle Écobilan de gestion des flux de l'eau et deséléments nutritifs. *In* : Soudi B. et al., eds. *Maitrisedes flux de matières et rationalisation des pratiquesagricoles*. Rabat : Actes Éditions, 108-120.

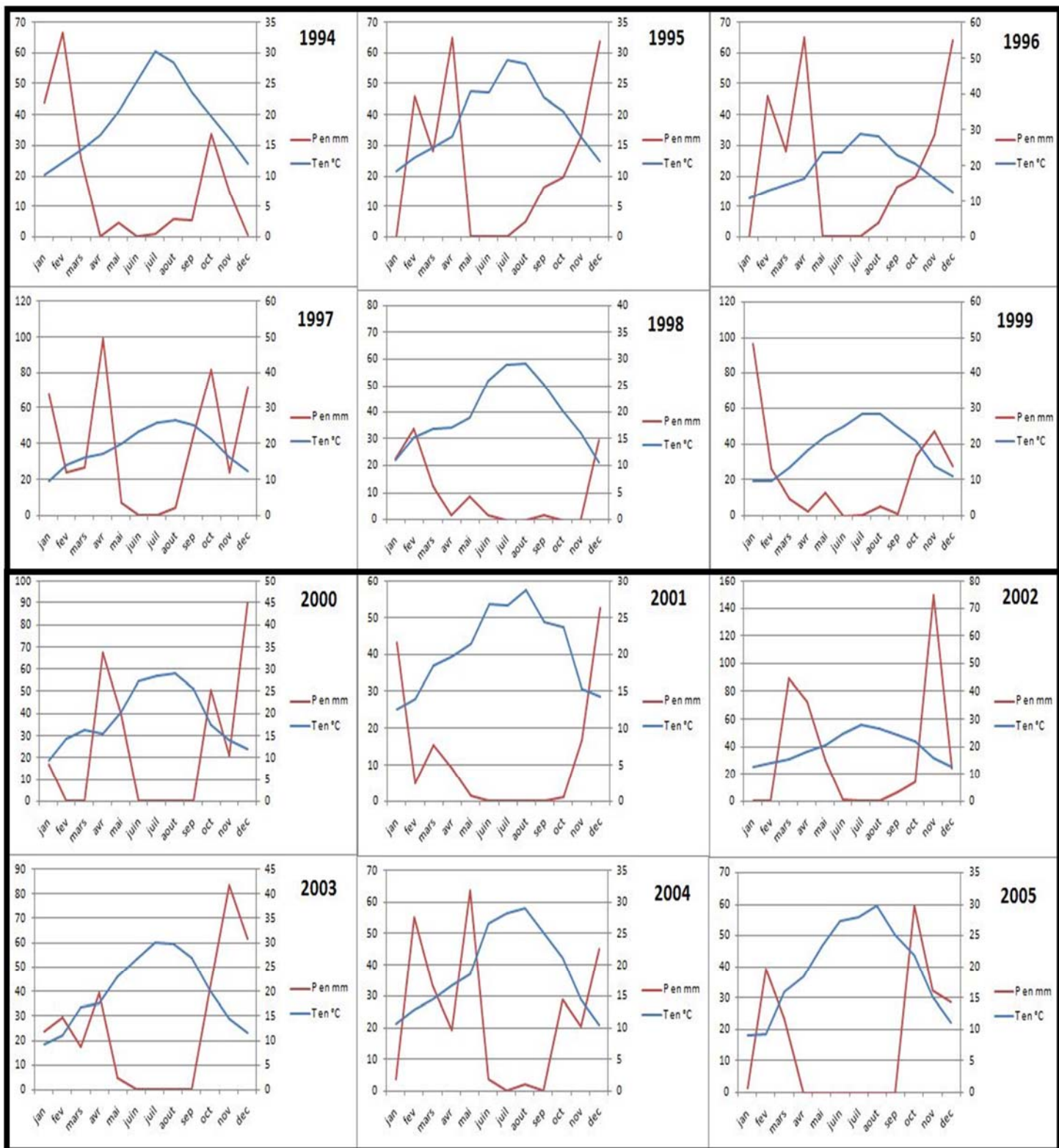
- [217] Fonder N. & Xanthoulis D., 2005. Le bilan azoté évalué par l'outil lysimétrique. In : Souidi B. et al., eds. *Maîtrises des flux de matières et rationalisation des pratiques agricoles*. Rabat : Actes Éditions, 203-216.
- [218] Aboukhaled A., Alfaro J.F. & Smith M., 1986. *Les Lysimètres*. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage, n°39. Rome : FAO.
- [219] Mathieu Deneufbourg, Christophe Vandenberghe, Benoît Heens, René Bernaerdt, Nathalie Fonder, Dimitri Xanthoulis, Jean Marie Marcoen ; 2010 ; Adaptation des pratiques agricoles en fonction des exigences de la Directive Nitrates et validation des résultats via le suivi lysimétrique de la lixiviation de l'azote nitrique ; *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2010 14(S1), 113-120 ;
- [220] Nathalie Fonder, Mathieu Deneufbourg, Christophe Vandenberghe, Dimitri Xanthoulis, Jean Marie Marcoen ; 2010 ; Suivi de la percolation du nitrate en terres cultivées par la technique lysimétrique. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2010 14(S1), 17-25.
- [221] SLATNI Ibtissem Etude de la destruction ou la perturbation des espèces végétales par la pollution Mémoire de magister 2013/2014 ;
- [222] BLIEFERT C. & PERRAUD R. 2001. chimie de l'environnement, Air, Eau, Sol, Déchets, 1ère éd, De Boeck Diffusion s.a ;
- [223] ORMVAT (2015). Etat d'avancement des projets. Site de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole de Tadla, ORMVAT ;
- [224] Alirio Arborera, Nicolas Ghilain et Françoise Gellens-Meulenberghs ; Evapotranspiration – Concepts ; Ouagadougou 5-9 Mai 2014 ;
- [225] LE CLOIREC P. 2001. Les biotechnologies adaptées au traitement des polluants gazeux. RECORD, 229 p, n°00-0407/1A ;
- [226] HAMMANI A. ET KUPER M. (2007) Caractérisation des pompes des eaux souterraines dans le Tadla, Maroc.

ANNEXES

Les diagrammes ombrothermiques des années 1970-2015.







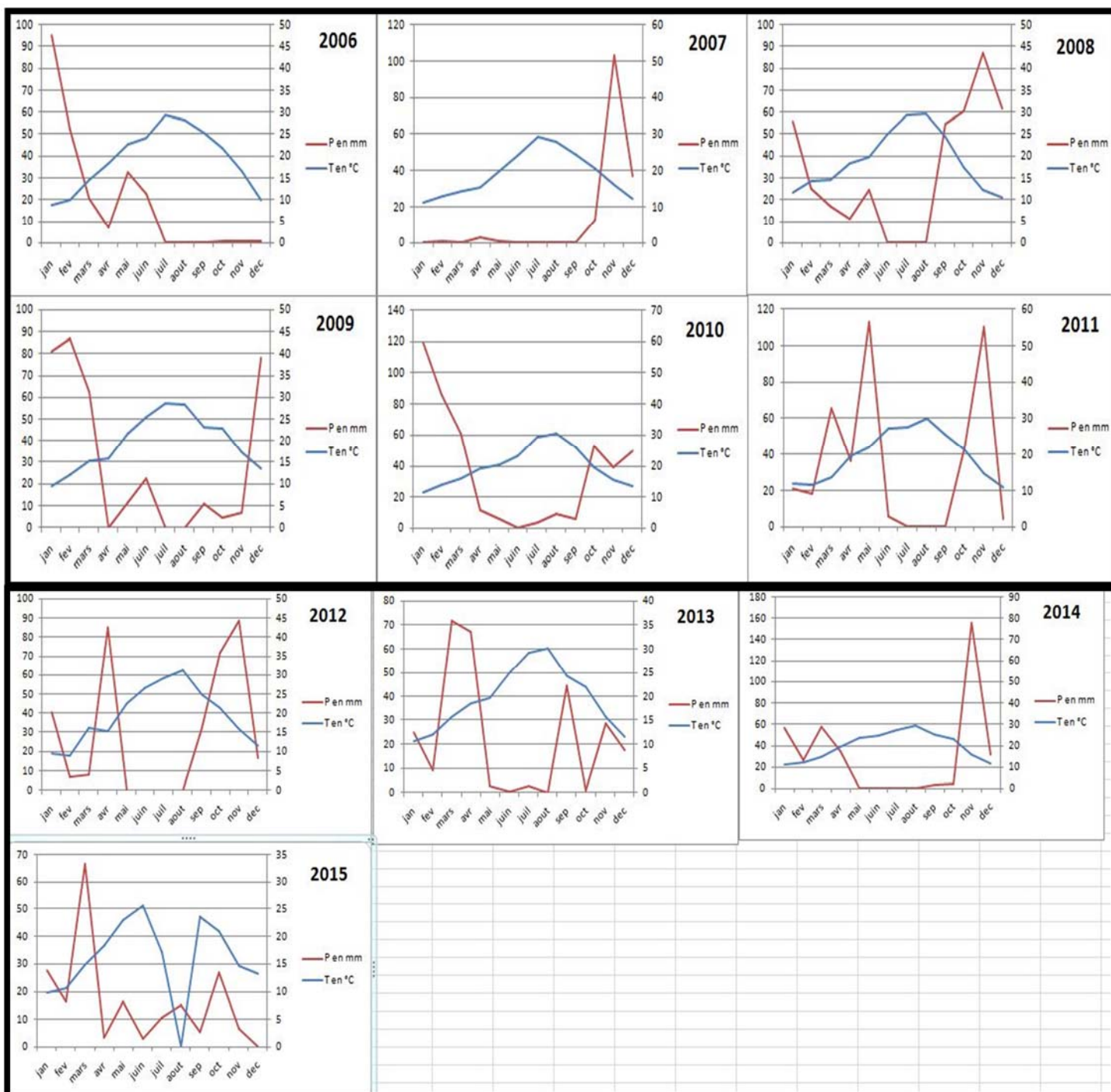


Figure 61: Les diagrammes ombrothermiques des années 1970-2015