

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE L'HYDRAULIQUE
«ARBAOUI Abdellah »**

DEPARTEMENT GENIE DE L'EAU

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN HYDRAULIQUE.**

OPTION : Conception Des Systèmes d'Irrigation et de Drainage

THEME :

**Etude de la vulnérabilité des eaux souterraines aux
fertilisants par la méthode prast.(cas des périmètres
irrigués de la mitidja Est).**

**Présenté par :
M^r : MOKHTARI SAMIR**

**Promotrice :
M^{me} D.DJODAR**

Devant le jury composé de :

Président : M^r T. KHETTAL

Examineurs : M^{me} S. LEULMI

M^{me} L.S. BAHBOUH

M^{me} H. BOUCHAMA

M^r M. MESSAHEL

Décembre /2011

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE L'HYDRAULIQUE
«ARBAOUI Abdellah »

DEPARTEMENT GENIE DE L'EAU

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN HYDRAULIQUE.

OPTION : Conception Des Systèmes d'Irrigation et de Drainage

THEME :

**Etude de la vulnérabilité des eaux souterraines aux
fertilisants par la méthode prast.(cas des périmètres
irrigués de la mitidja Est).**

Présenté par :
M^r : MOKHTARI SAMIR

Promotrice :
M^{me} D.DJODAR

Devant le jury composé de :

Président : M^r T. KHETTAL

Examineurs : M^{me} S. LEULMI

M^{me} L.S. BAHBOUH

M^{me} H. BOUCHAMA

M^r M. MESSAHEL

Décembre /2011

ملخص

الهدف الرئيسي لهذه الأطروحة هو القيام بمعاينة الوضعية الحالية للنوعية الكيميائية للمياه على مستوى متيجة الشرفية و الشريط الساحلي لمدينة الجزائر.

ولهذا، بدأنا بتحديد الوضعية الجيومرفولوجية، الهيدرولوجية، الجيولوجية والهيدرولوجية للمنطقة المدروسة. و بعد ذلك، من أجل التأكد من نسبة تلوث المياه، قمنا بدراسة هيدروكيميائية، وانطلاقا من هذه العملية توصلنا إلى إنشاء خرائط لتحديد موقع المركبات الكيميائية للمياه بواسطة (S.I.G). و نظام الاستعلام الجغرافي (MAP INFO) و في الأخير، بينت لنا هذه الدراسة مدى توسع كيمياء المياه للمنطقة المدروسة وأنواع التلوث الناتج عن نفايات المصانع، بقايا الأسمدة والتوسع العمراني الذين يؤثران سلبا على قدرات التطهير الذاتي للوديان و الطبقات السطحية لمخزن المياه الجوفية.

Résumé

Dans cette thèse on vient d'étudier la vulnérabilité de la zone de Mitidja Est, qui vise à protéger les eaux souterraines d'une contamination prévisible, causée par la pollution hydrique.

Cette dernière elle même constitue le danger menaçant les eaux souterraines, elle provient des rejets industriels et des agglomérations ainsi que des résidus des amendements chimiques agricoles.

Cette étude permet de connaître les zones les plus exposées et les plus susceptibles d'être polluées et de prévoir les mesures et les ouvrages à mettre en œuvre pour éviter la contamination de la nappe mais les eaux souterraines ne sont pas la partie la plus importante des eaux conventionnelles elles sont stratégiques pour cela leur préservation est impérative et indispensable.

Notre étude a été réalisée sur terrain, les données recueillies sur terrain ont été traitées à l'aide de deux logiciels : (MAPINFO), (SIG).

Abstract

The main objective of this report is to make a report on the current state of the chemical quality of waters of Mitidja East and bay of Algiers.

To do it, we defined, first of all, contexts: geomorphologic, hydroclimatological, geologic and hydro geologic of the region of study.

Afterward, for a good estimation of the water pollution, a hydro chemical study was realized. Then, From this estimation, we established cards (maps) of chemical fancy of waters by using Map info as well as a geographical information system (S.I.G).

In conclusion, this work allowed us to bring to light the evolution of the chimisme of the water of the region of study and the type of pollution of in the refusals of the industry, the agriculture and the increasing urbanization which saturate the capacities of autopurge of oueds and superficial coats of an aquifer.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail en signe de reconnaissances et de respect :

- *A ma mère et mon père pour tous les sacrifices qu'ils ont consenti à mon égard;*
- *A mes frères et mes sœurs*
- *a tout les enfants :abdou, chaimaa, med tahar, med bandora, zahra djinane, safia tasnim, hafsa, bouchra.*
- *A toute la famille mokhtari*
- *A mes amis a el bayadh, ensh et toutes personnes ayant participés de prés ou de loin à ce modeste travail.*

Samir

remerciements

D'abord je remercie dieu tout puissant pour m'avoir permis d'accomplir dans les meilleures conditions ce travail et toutes mes études.

Ma reconnaissance va plus particulièrement à :

Ma promotrice M^{me} djouhar dahbia. Pour sa disponibilité

Et son aide.

A L'ensemble des enseignants qui m'ont suivi durant mon cycle d'étude.

Mon respect aux membres du jury qui me feront l'honneur d'apprécier mon travail.

Je tiens à remercier Madame Leila Souad BAHBOUH, Chargé de Cours à l'ENSH, qui a bien voulu par son aimable bienveillance, diriger ce travail qu'elle trouve ici l'expression de mon profond respect.

Je n'oublie pas non plus tous mes amis et les membres de ma famille qui on toujours encouragé. Je pense à : maroine , mustapha, younes, benameur, hicham, Groupe belmawez, colech, samirjari, hamid, housam, fellouh, bachir, k̄hiati, chrif, rabah, meliani, attalah, mino, chibi, guichaoui, Oussama, lak̄hdar, said et le groupe d'irrigation(2010/2011).

Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail.

Mok̄htari.s

SOMMAIRE

	page
INTRODUCTION GENERALE.....	1
 <u>CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.</u>	
I Présentation de la zone d'étude.....	2
I -1 Situation géographique de la plaine de la Mitidja	3
I -2 Présentation de la zone d'étude : la Mitidja Est.....	3
 II- Etude géomorphologique de la région d'étude.....	
II -1 Topographie	3
II -2 Réseau hydrographique	4
II -3 Couvert végétal	5
III- Les paramètres climatiques.....	6
III -1 Précipitations météoriques.....	6
III -1 -1 Le réseau pluviométrique.....	6
III-1 -2 Précipitations moyennes mensuelles.....	6
 III-2 Etude des températures	
III-2 -1 Températures extrêmes.....	7
III-2 -2 La température moyenne annuelle:.....	8
III-3 Le vent	8
III-4- Classification du climat.....	9
1) Selon la méthode de Martonne.....	8
2) Selon le diagramme d'Emberger	8
III-5- Bilan hydrique.....	10
III-5-1 Etude de l'évapotranspiration.....	10
III-5-1-1 Étude de l'évapotranspiration potentiell.....	11
a) La formule de Thornthwaite :	11
b) La formule de Serra:	12
III-5-1-2 Etude de l'évapotranspiration réelle.....	14
1) Formule de TURC	14

2) Formule de COUTAGNE.....	15
3) Méthode de WUNDT:.....	15
III-5-2 Estimation du bilan hydrologique	16
1) Estimation de la lame ruisselée	16
2) Estimation de la lame infiltrée	17
3) Résultats du bilan hydrologique	18

CHAPITRE II : ETUDE GEOLOGIQUE.

Introduction.....	19
II- 1contexte géologique.....	19
II- 2Stratigraphie et litho stratigraphie	21
II-2-1-Le socle primaire	21
II-2-2-Le Mésozoïque	21
II-2-3-Le Tertiaire:.....	21
II-2-3-1-Le Miocène et roches plus anciennes	21
a-Le Miocène	21
b-les formations plus anciennes	21
b1- Roches éruptives du Tertiaire.....	21
b2- Roches métamorphiques	22
II-2-3-2- Le Pliocène	22
II-2-3-2-1- Le Plaisancien	22
II-2-3-2-2- L'Astien	22
II-2-4-Le Quaternaire	22
II-2-4-1- Villafranchien (calabrien) : formation d'El Harrach.....	22
II-2-4-2- Soltanien-Soltiftien (Tyrrhénien) : formation de la Mitidja.....	23
II-2-4-3- Le Rharbien –Actuel	23
Conclusion	26

CHAPITRE III : ETUDE HYDROGEOLOGIQUE.

• Introduction	27
III-1- Hydrogéologie de la plaine de la Mitidja:.....	27
III-1-1- Morphologie et structure des aquifères	27

III-1-1-1 -L'aquifère de l'Astien :.....	28
III-1-1-2- Aquifère de la Mitidja:.....	28
III-1-2- Les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères:.....	29
III-1-2-1- L'aquifère Astien:.....	29
III-1-2-2- L'aquifère de la Mitidja:.....	29
III-1-2-3- Aperçu de la surexploitation des aquifères:.....	30
III-1-3- Les mécanismes d'alimentation et d'écoulement des nappes:	30
III-1-3-1- L'aquifère Astien:.....	30
• Alimentation:.....	30
• Exutoires :.....	31
III-1-3-2-L'aquifère de la Mitidja	31
• Les apports:.....	31
• Les exhaures et les pertes de l'aquifère de la Mitidja.....	32
III-1-4- Bilan entrant et sortant des aquifères:.....	32
III-1-4-1- Bilan d'eau de la nappe de l'Astien:	32
III-1-4-2- Bilan d'eau de la nappe de la Mitidja.....	32
III-2- Etude piézométrique	33
III-2-1-Cartes piézométriques	34
a)-Carte piézométrique de la Mitidja (Avril, 2010)	34
b)-Carte piézométrique de la Mitidja (Octobre, 2010).....	34
III-2-1-2- Fluctuation de la surface piézométrique dans le temps.....	37
• Conclusion	38

CHAPITRE IV : ETUDE HYDROCHIMIQUE.

I- Introduction.....	39
IV-1- Analyse des données chimiques	39
IV-1-1-Analyse des caractéristiques physicochimique.....	40
IV-1-1-1-Paramètres physiques	40
a)Le potentie d'hydrogene(pH):.....	40
b) La conductivité électrique	40
b-1 Campagne, Hautes eaux 2010	41
b-2 campagne, Basses eaux 2010.....	41
c) Le Résidu sec	44

IV-1-2-2- Paramètres chimiques et Interprétation des cartes hydrochimiques	44
a-Carte d'isoteneurs en Chlorure	44
b-Carte d'isoteneurs en Nitrates:	44
c-Carte d'isoteneurs en Calcium	45
d-Carte d'isoteneurs en Magnésium	45
e-Carte d'isoteneurs en Sodium	45
f-Carte d'isoteneurs en Sulfates	46
g-Carte d'isoteneurs en Bicarbonate	46
IV-2- Classification des eaux de la nappe de la Mitidja Orientale :	54
IV-2-1- Classification des eaux d'après le diagramme de Piper :	54
VI-2-2 : Aptitudes des eaux à l'irrigation :	56
IV-2-2-1 : La classification de la FAO	57
IV-2-2-2 : La classification américaine (USDA)	57
A- Classification par rapport à la CE	57
B- La classification par rapport au SAR :	57
C- L'utilisation du SAR et la CE pour évaluer les problèmes d'infiltration :	59
Interprétation des résultats	59
III-3-3 : Cartographie de la qualité des eaux	59
• Etablissement des cartes	59
IV- :Conclusion :	62

CHAPITRE V : Evaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines par la méthode de PRAST.

I-Concepts de vulnérabilité	63
II- Méthodes d'évaluations de la vulnérabilité :	64
II-1 : Définition de vulnérabilité :	64
II-3 : Différentes méthodes d'estimation de la vulnérabilité :	65
II-3-1 : Méthodes orientées sur les systèmes de cotation numérique	65
II-3-1-1 : Méthode de SILKA (1978)	65

II-3-1-2 : Méthode de THORHIL (DRASTIC) 1985.....	66
II-3-1-3 : Méthode GOD (Foster et Hirata, 1991).....	66
II-3-1-4 : Méthode PRAST.....	67
II-3-1-5 : Méthode du pouvoir épurateur du sol (Rehse, 1977).....	67
II-3-2 : Méthodes orientées sur des documents cartographiques.....	67
II-3-2-1 : Méthode d'Albinet et de Margat (1970).....	67
II-3-2-2 : Méthode wipp (1982).....	68
II-3-2-3 : Méthode anglaise NRA (National River Authority).....	68
II-3-3 : Méthodes générales ou mixtes.....	68
II-3-3-1 : Méthode de Vierhuff (1982).....	68
II-3-3-2 : Méthode de Villumsen et Sonderskov (1982)	68
II-3-3-3 : Méthode de Haerté (1983).....	69
III- Aspects théoriques et pratiques de la méthode PRAST.....	69
III-1 : Les paramètres PRAST :.....	69
III-1-1 : Recharge nette	70
III-1-2 : Nature du matériel aquifère	70
III-1-3 : Type de sol	71
III-1-4 : Topographie.....	72
III-1-5 : La méthode utilisée pour l'estimation du pouvoir épurateur :.....	72
III-2 : Construction de la carte de vulnérabilité (aller <i>et al</i> ,1987).....	74
III-3 : CARTOGRAPHIE ASSISTEE PAR ORDINATEUR :.....	75
III-3-1 : Réalisation des cartes thématiques et description des paramètres :.....	75
III-3-1-1 : Carte du paramètre « P », Pouvoir épurateur :.....	76
III-3-1-2 : Carte du paramètre « R », la recharge :.....	76
III-3-1-3 Carte du paramètre « A », nature du milieu aquifère :.....	77
III-3-1-4 : Carte du paramètre « S », nature du sol :.....	77
III-3-1-5 : Carte du paramètre « T », la topographie :.....	78
III-3-2 : Réalisation de la carte de vulnérabilité finale et hiérarchisation des unités hydrogéologiques:.....	83
Interprétation de l'indice PRAST.....	83

CHAPITRE IV : CALCUL HYDRAULIQUE.

I- Introduction.....	86
II- : Besoin en eau du périmètre:.....	86
II -1 : Calcul des précipitations annuelles :.....	87

a)justement à la loi de Gumbel:.....	87
II.1.1. Pluies d'une Durée Autre Que 24 Heures : Méthode Directe	87
II.1.2. Pluies de courte durée : Méthodes indirectes.....	91
b) Détermination de l'année de calcule	92
III- : Méthode de PENMAN&MOTHEIT modifiée :.....	92
a)-La pluie efficace	94
b)-Détermination des besoins en eau d'irrigation.....	94
IV : Calcul du débit caractéristique du réseau « q_c » :.....	95
Définition :.....	95
IV-1- : Cas ou l'excès provient la pluie critique:.....	95
IV-1-1 Détermination de la pluie critique :.....	95
IV-1-2 En régime permanent :.....	97
Sans stockage :.....	97
En tenant compte du stockage :.....	97
IV-1-3 En régime variable	98
IV-1-4 Cas ou l'excès provient de l'irrigation :.....	99
a) Pour la maraichère :	99
b) pour l'arboriculture :	99
CONCLUSION GENERALE.....	101

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Caractéristiques générales des stations pluviométriques.....	06
Tableau I-2: Précipitations moyennes annuelles et mensuelles de la Mitidja Est	06
Tableau I-3 : Les températures moyennes mensuelles maximales, minimales et annuelles pour la station de HAMIZ. (Période 1987/2010).....	07
Tableau I-4: : vitesses des vents (Km/h) à HAMIZ (1987-2010).....	08
Tableau I-5 : Limite des climats d'après l'indice climatique de Martonne.....	09
Tableau I-6 : calcul de l'ETP à la station de hamiz (1987-2010) arlaformuleC.W.Thornthwaite...	12
Tableau I-7 : Calcule de l'ETP à la station de hamiz (87-10) par la formule de Serra.....	13
Tableau I-8 : l'évapotranspiration réelle E.T.R selon Turc	14
Tableau I-9: l'évapotranspiration réelle E.T.R selon Coutagne.....	15
Tableau I-10 : l'évapotranspiration réelle E.T.R selon WUNDT	16
Tableau I-11 : Résultats de l'E.T.R obtenu par les trois méthodes.....	16
Tableau I-12: Résultats d'évaluation de la lame ruisselée	17
Tableau I-13 : Résultats de calcul de la lame infiltrée.....	17
Tableau I-14 : Résultats d'évaluation du bilan hydrologique.....	18
Tableau III-1: Tableau récapitulatif des points d'eau et des débits extraits réalisés en 1997 Complété en 2001-2002 dans la plaine de la Mitidja	30
Tableau III-2 : Bilan d'eau de la nappe de l'Astien.....	32
Tableau III-3 : Débits entrants de la nappe de la Mitidja.....	33
Tableau III-4 : Débits sortants de la nappe de la Mitidja	33
Tableau IV-1 Principaux ions présents dans l'eau d'irrigation : (A. Phocaides).....	56
Tableau IV-2 : classification mondiale de la FAO des eaux d'irrigation par rapport à la conductivité électrique.....	57
Tableau IV-3: classification américaine (USDA) des eaux d'irrigation par rapport à la conductivité électrique.....	57
Tableau IV-4: problème potentiel d'infiltration du au sodium dans l'eau d'irrigation	58
Tableau IV-5 : la valeur Moyenne du SAR, CE et PH.....	59
Tableau V-1 : Pouvoir épurateur du sol dans la couverture (zone non saturée) Rhese1977.....	73
Tableau V-2 : Code international des couleurs pour les intervalles de l'indice PRAST (Aller et al ; 1987 modifié, in Touileb, 1997).....	75
Tableau VI-1 : tableau de représentation de la Répartition des culture.....	86

Tableau VI-2 : Calcul de la pluie durée à l'aide de la formule de MONTANA.....	90
Tableau VI-3 : Hauteurs et les fréquences des pluies du semestre de printemps.....	91
Tableau VI-4 : Précipitation moyenne mensuelle de l'année de calcul.....	92
TableauVI-5 : Evapotranspiration de référence selon la méthode Penman&Monteith.....	94
Tableau VI-6: Besoins en eau des cultures en (mm).....	95
Tableau VI- 7 : paramètres usuelles des cultures.....	96
Tableau VI- 8 : pluie critique (mm).....	96
Tableau VI-9: la pluie critique finale en (mm).....	96
Tableau VI-9: la pluie critique finale en (mm).....	97
Tableau VI-11: la porosité efficace en fonction de la texture du sol.....	98
Tableau VI-12: la hauteur optimale de la nappe en fonction de la culture.....	98
Tableau VI-13: le débit caractéristique en (l/s/ha).....	99

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : Situation de la plaine de la Mitidja.....	02
Figure I-2 : situation géographique de la Mitidja Est	03
Figure I-3:réseaux hydrographique du bassin versant de la mitidja est.....	05
Figure I-4:Variation des températures au niveau de la station de HAMIZ(1987-2010)	07
Figure I-5 : vitesses des vents (Km/h) à la station HAMIZ (1987-2010).....	08
Figure II-1 : Carte géologique de la Mitidja. Bennie and Partners, 1983).....	20
Figure II-2 Coupe interprétative de la Mitidja dans le bassin de Mazafran (Achie1971).....	24
Figure II-3:Carte géologique de la plaine de la Mitidja Est (Mac Donald et Partners, 1992).....	25
Figure IV-1 : Situation des points d'eaux de la Mitidja Est.....	39
Figure IV-2 Domaine de variation du pH des échantillons analysés(Campagne: Avril, 2010).....	40
Figure IV-3 Carte d'isoconductivité en $\mu\text{S}/\text{cm}$ (campagne, avril 2010).....	42
Figure IV-4 d'isoconductivité en $\mu\text{S}/\text{cm}$ (campagne, basses eaux 2010).....	43
Figure IV-5 : Carte d'isoteneur du chlore en mg/l(campagne, avril 2010).....	47
Figure IV-6 : Carte d'isoteneur en nitrates en mg/l(campagne, avril 2010).....	48
Figure IV-7 : Carte d'isoteneur en Calcium en mg/l(campagne, avril 2010).....	49
Figure IV-8 :Carte d'isoteneur en Magnésium en mg/l(campagne, avril 2010).....	50
Figure IV-9 : Carte d'isoteneur en Sodium en mg/l(campagne, avril 2010).....	51
Figure IV-10 : Carte d'isoteneur en Sulfates en mg/l(campagne, avril 2010).....	52
Figure IV-11 : Carte d'isoteneur en Bicarbonates en mg/l(campagne, avril 2010).....	53
Figure IV-12 diagramme de piper pour les eaux de la nappe alluviale de la Mitidja Est(campagne,avril 2010).....	55
Figure IV-13 : Carte de l'évolution du SAR (campagne, avril 2010).....	60
Figure IV-14 : Carte de l'évolution du SAR (campagne Basses eaux 2010).....	61
Figure V-1 : Représentation graphique de la variation de la cote en fonction des caractéristiques du milieu aquifère (Aller <i>et al</i> ; 1987 in Touileb, 1997).....	71
Figure V-2 : Carte du paramètre « P », Le Pouvoir épurateur.....	79
Figure V-3 : Carte du paramètre « R », la recharge de la nappe.....	80
Figure V-4 : Carte du paramètre A, nature du matériau aquifère	81
Figure V-5 : Carte du paramètre « S », type de sol.....	82
Figure V-6 : Carte du paramètre « T », nature de la topographie	83
Figure V-7 : Carte de vulnérabilité à la pollution PRAST du bassin de la Mitidja Est.....	84
Figure V-8 Diagramme des classes de vulnérabilité selon la méthode PRAST(Touileb,1997).....	85
Figure VI-1 : Courbe Pluie –Durée.....	90
Figure VI -2 : Les courbes H.D.F (hauteur, durée, fréquence) printemps.....	92

INTRODUCTION GENERALE :

La qualité des eaux dans le monde a connu ces dernières années une grande détérioration à cause des rejets industriels non contrôlés, de l'utilisation intensive des engrais chimiques dans l'agriculture ainsi que de l'exploitation désordonnée des ressources en eau. Ces derniers produisent une modification chimique de l'eau et la rende impropre aux usages souhaités. Plusieurs cas de pollution ont déjà fait l'objet de nombreuses études et publications dans des journaux internationaux.

La prévention de la ressource hydrique vis-à-vis des multiples agressions générées par l'homme devient alors incontournable. Les grands systèmes aquifères subcôtiers, dont la plaine de la Mitidja, sont particulièrement vulnérables à la pollution quelque soit son origine.

Plusieurs études ont déjà été réalisées sur la plaine de la Mitidja dont des mémoires d'ingénieur et des thèses de doctorat, ces dernières indiquant le rôle principal de l'industrie, de l'agriculture ainsi que la nature des formations géologiques dans la détérioration de la qualité des eaux.

Ainsi, l'étude de la qualité des eaux de la plaine de la Mitidja Orientale sera basée sur les études que nous mènerons ; à savoir :

- la géomorphologie consistant à déterminer les différents paramètres physiographiques et morphologiques ayant une influence sur l'écoulement dans le bassin versant.

- une étude hydrologique traitant les caractéristiques climatiques de la plaine et la détermination du bilan hydrologique influençant directement les ressources hydriques du point de vu quantité. Nous nous attacherons, ensuite, à déterminer les volumes ruisselés pour connaître, par différence, le déficit d'écoulement, les pertes et le volume des eaux infiltrées alimentant les réserves souterraines de la nappe alluviale

- une synthèse géologique de la région dans laquelle seront décrit la stratigraphie et la structure géologique de la zone d'étude.

La protection et la préservation de ces ressources sont d'une nécessité de premier ordre, et dans ce cadre et dans le but de préserver notre zone d'étude (la Mitidja est), on a utilisé un outil efficace pour limiter et contrôler les risques de dégradation de la qualité de ces eaux, qui est la cartographie de la vulnérabilité environnementale, et pour faire nous avons utilisé la méthode PRAST ; méthode de vulnérabilité à la pollution de la nappe, basée sur les paramètres relatifs à la zone non saturée de l'aquifère en utilisant le paramètre <P> pouvoir épurateur et d'autre quatre paramètres basés sur la méthode DRASTIC.

I - Présentation de la zone d'étude

I-1 Situation géographique de la plaine de la Mitidja

La Mitidja est une dépression allongée d'Ouest en Est qui s'étend sur une longueur d'à peu près (moyenne d'environ) 90 km depuis Hadjout à l'ouest jusqu'à la vallée de l'oued Boudouaou à l'Est, avec une largeur moyenne de 15 km environ. Elle constitue une vaste plaine alluviale qui couvre une superficie géographique d'environ 1400km² répartie entre les wilayas d'Alger, Blida, Tipaza et de Boumerdès.

Les limites de la nappe aquifère se confondent avec celle de la plaine Mitidja proprement dite, elle est délimitée au Sud par les piémonts de la chaîne montagneuse de l'Atlas Blidéen et au Nord par le Sahel, bande collinaire de quelques kilomètres de large qui borde la mer Méditerranée. La baie d'Alger, à l'Est de la ville, incise le Sahel, le divisant ainsi en deux parties : le Sahel Ouest et le Sahel Est.

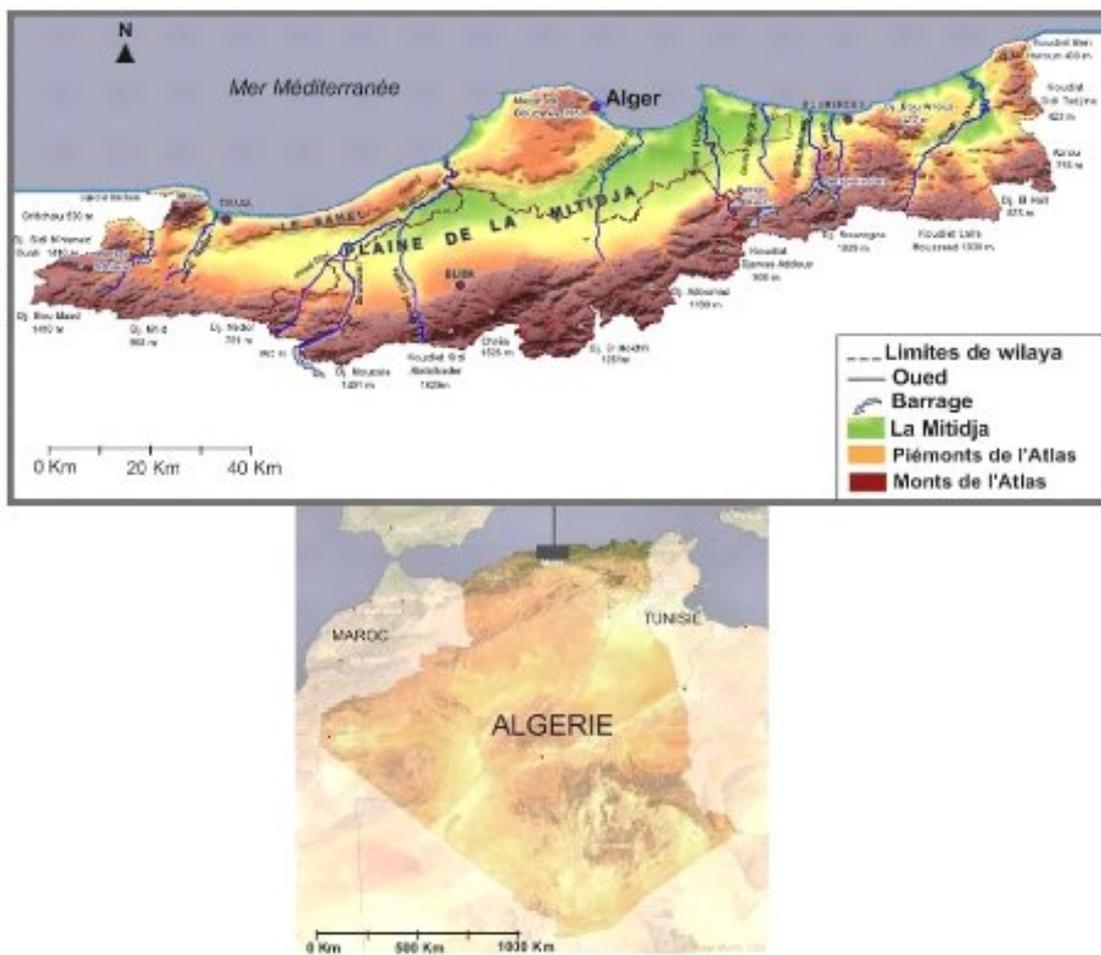


Figure I-1 : Situation géographique générale de la plaine de la Mitidja et de la zone d'étude. (Source : <http://www.memoireonline.com>)

- **La plaine de la Mitidja Est:** une vaste région affaissée avec un axe de dépression **ENE-OSO**, bordée par le Sahel au nord et l'Atlas Blidéen au sud, avec une altitude qui varie de **10** à **100m**. Elle est de loin la plus intéressante de part ses ressources en eaux souterraines, c'est également la région la plus développée, tant du point de vue agricole, qu'industrielle et démographique.

- **l'atlas Blidéen:** constitue la limite sud de notre secteur d'étude. Ce massif montagneux de direction **NE-SO** se développe à partir de la bordure de la plaine et atteint une altitude moyenne qui évolue entre **1200** et **1600 m**. Il représente ainsi la case départ des cours d'eau traversant la plaine.

En outre la plaine de la Mitidja Est est répartie entre deux sous bassin versant (bassin versant des oueds El Harrach et El Hamiz) qui appartiennent en totalité au grand bassin versant des côtiers algérois (02).

II-2- Réseau hydrographique:

Cinq oueds principaux drainent la plaine de la Mitidja : Oued Nador, Oued Mazafran, Oued El Harrach Oued Hamiz et Oued Reghaia. Ces cours d'eaux, nés dans l'Atlas, traversent la plaine du Sud au Nord aussi directement que possible et franchissent le Sahel par des cluses. Ceci n'exclue pas certaines divagations dues surtout au fait que ces Oueds, au débouché dans la plaine, ont édifiés des cônes de déjections (cône de Blida et Rovigo) parfois très importants. Dans notre étude, on s'intéresse qu'à la partie orientale de la Mitidja. Trois Oueds principaux la drainent : Oued El Harrach, Oued El Hamiz et Oued Réghaïa.

- **Oued El Harrach** : Cet oued est dévié plusieurs fois. Actuellement il traverse la plaine du sud au nord pour s'infléchir vers le N.E. au pied du sahel jusqu'à la cluse d'El Harrach. Vers le milieu de la plaine l'oued ElHarrach reçoit sur sa rive droite l'oued Djemâa.

- **Oued El Hamiz** : Cet oued qui prend une direction N.O. à partir de Fondouk jusqu'à Hamadi se redresse jusqu'au Sahel pour se jeter dans la mer au sud de cap Matifou. (BordjEl Bahri) précédemment, l'oued El Hamiz se jetait dans la mer par la cluse de l'oued Reghaia .Un affluent de l'oued Smar aurait opéré la capture de l'oued El Hamiz par érosion régressive.

Dès lors le Hamiz suivant l'oued Smar aurait coulée vers l'Harrach.

(Documentations de l'ANRH d'Alger)

- **Oued Reghaia** : L'Oued Reghaia privé de l'Oued El Hamiz parvient mal à s'écouler au fond de l'immense cluse dont elle avait hérité, ce qui pourrait la persistance du marais

NB : les 03 oueds principaux de la Mitidja Est sont représentés dans le réseau hydrographique (figure I-3).

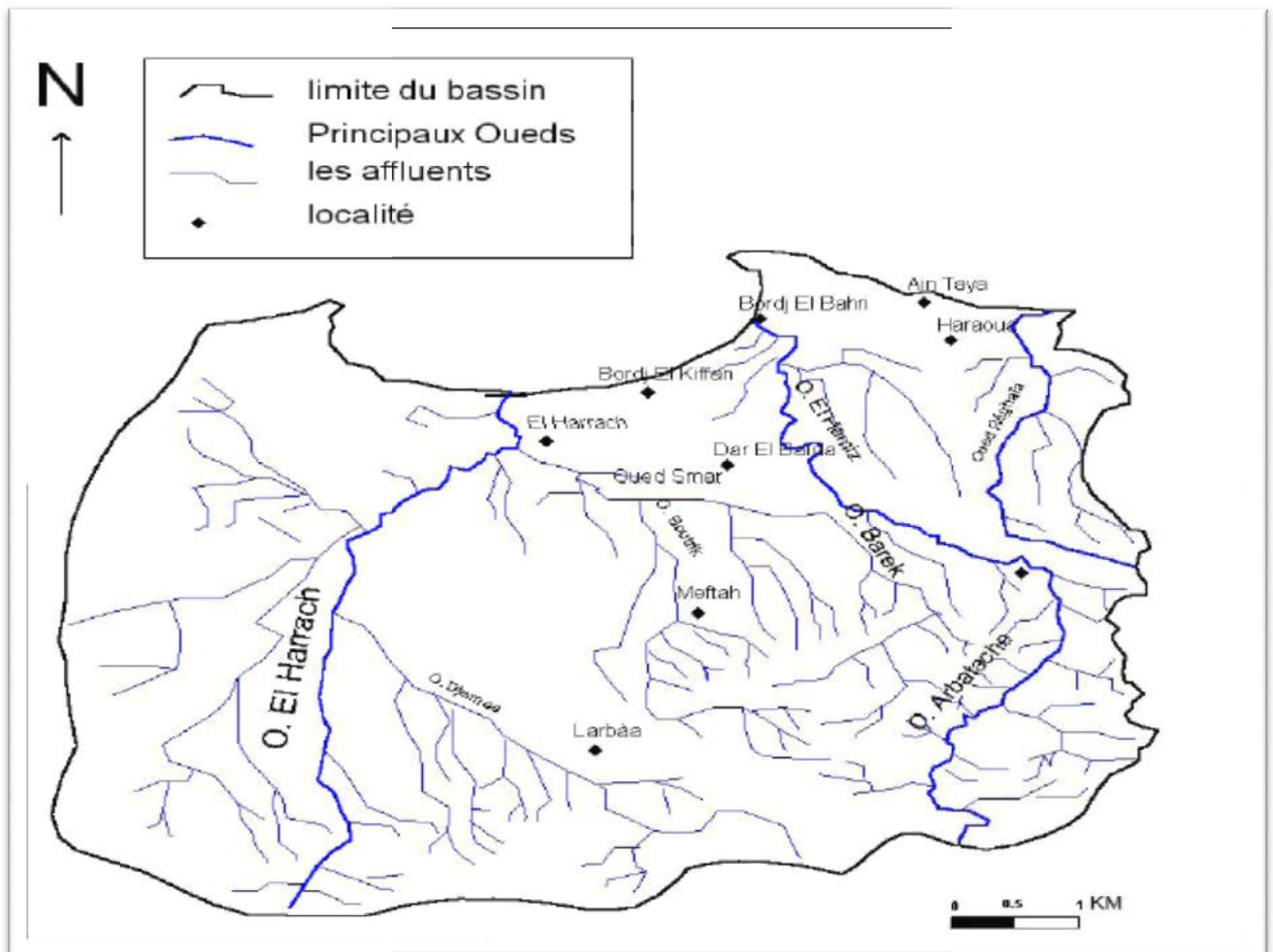


Figure I-3 : Réseau hydrographique du bassin versant de la Mitidja Est

II-3- Couvert végétal :

La couverture végétale joue un rôle important dans le comportement hydrologique du bassin de la Mitidja. Elle a une influence mécanique sur le ruissellement superficiel, en plus du fait qu'elle conditionne l'évapotranspiration et donc le bilan hydrologique du bassin.

La plaine de la Mitidja est une région agricole très intensive de l'Algérie, en raison de sa topographie et de sa fertilité. Les activités agricoles les plus répandues sont l'arboriculture et les cultures maraîchères.

III- Les paramètres climatologiques :

III-1- Précipitations météoriques :

III-1-1- Réseau pluviométrique :

Les précipitations sont définies comme l'ensemble des eaux météorologiques recueillies par un bassin versant ou une surface bien déterminée. Elles peuvent se présenter sous forme liquide (pluie, brouillard, rosée...) ou sous forme solide (neige, grêle,...). Pour mieux caractériser le régime climatique dans la région d'étude qui est inclut dans

Le bassin versant des côtiers algérois (code 02), nous avons choisi cinq stations climatiques, systématiquement sur la surface du bassin versant (tableau I-1), couvrant une période de 35 ans (1975-2010), les différentes caractéristiques relatives à ces stations sont regroupées dans le même tableau.

Tableau I-1 : Caractéristiques générales des stations pluviométriques

stations	code ANRH	X (km)	Y (km)	Z (m)	période de fonctionnement
hamiz	020602	558.55	367.4	130	1975-2010
reghaia	020632	557.8	382.25	20	1975_2010
larbaa	021403	541.15	362.95	100	1975_2010
baraki	021421	535.05	376.5	20	1975_2010
Ouled ali	020627	553	371.65	67	1975_2010

III-1-2- Précipitations moyennes mensuelles :

Les précipitations moyennes mensuelles sur une période d'observation de 35 ans (1975 à 2010) pour les cinq stations sont représentées dans le tableau (I-2). Elles sont obtenues en faisant la somme de tous les mois des années d'observations et on calcul la moyenne par la suite. Les séries pluviométriques sont représentées dans l'Annexe

Tableau I-2 : Précipitations moyennes mensuelles (1975-2010)

Stations	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JU	O	Annuel
Hamiz	32,81	60,67	96,6	115,2	93,85	86,09	64,7	70,9	53,68	9,18	3,23	4,32	691,23
Reghaia	27,12	54,73	101,1	96,98	79,43	71,83	54,6	54,98	47,45	8,29	3,44	3,55	603,5
Larbaa	33,2	51	104,1	101,8	80,4	68,5	58,7	46,8	31,8	7	2	9,6	594,9
Baraki	28,01	55,51	97,33	94,8	68,68	53,42	55,32	33,34	7,72	4,84	5	5,09	509,06
Ouled ali	32,6	53,1	99,4	107,1	76	82,5	52,3	47,2	46,1	11,6	6	4,5	618,4

La moyenne annuelle des précipitations enregistrer sur notre bassin versant est de **603,418 mm**.

III-2- Etude des températures

Le tableau ci-dessous, présente les températures moyennes mensuelles maximales et minimales, prélevées durant la période 1987/2010.

Tableau I-3 : Les températures moyennes mensuelles maximales, minimales et annuelles pour la station de HAMIZ. (Période 1987/2010).

Paramètres	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Tmoy (°C)	24,2	20	16	13	11	12	13,2	15	18	22	25	26,3
Tmin (°C)	18.1	14	10	7.3	5.6	5.7	7.2	8.9	13	16	19	20.1
Tmax (°C)	30,1	26	21.1	18.3	17	18	19.2	21	23.5	27.9	31.4	32.4

D'après les valeurs moyennes mensuelles des températures mentionnées dans le Tableau I-3 ou Figure (1-4) on constate que les mois de juin, juillet et août sont les plus chauds, par contre les mois de décembre et janvier sont les plus froids.

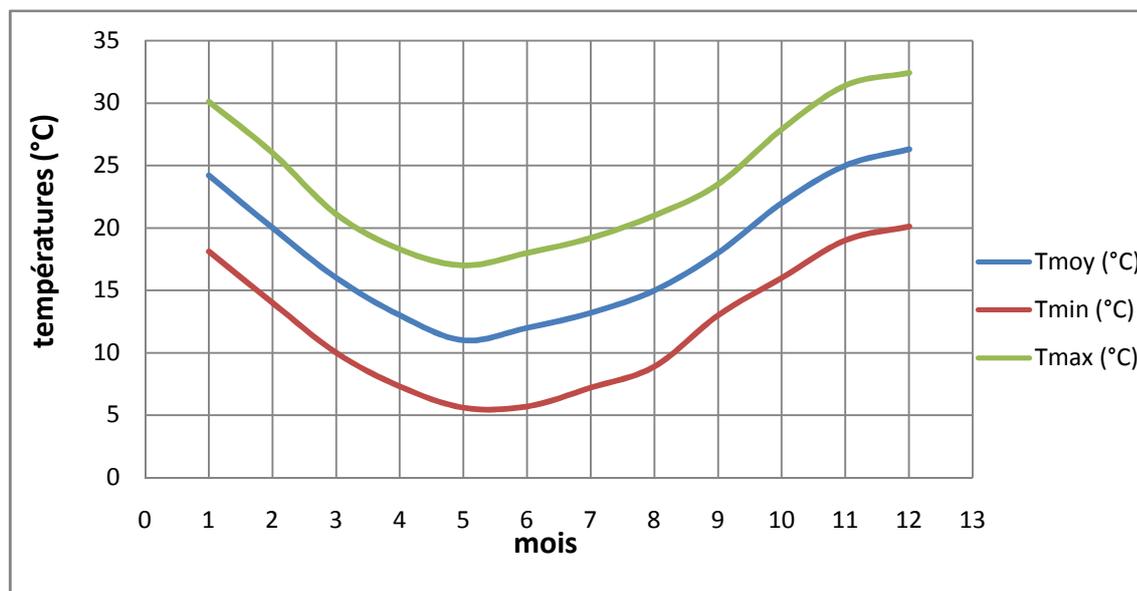


Figure I-4: Variation des températures au niveau de la station de HAMIZ (1987-2010).

III-2 -1- Températures extrêmes

On constate d'après la représentation graphique des températures relevées au niveau de la station de HAMIZ durant la période allant de 1987 à 2010, que le

mois d'Août est le plus chaud avec une température de **32,4°C**, alors que le mois de Janvier est le plus froid avec une température de **5,6°C**.

III-2 -2 La température moyenne annuelle: La moyenne arithmétique des températures moyenne mensuelle qui correspond à la période d'étude est de : **17,98°C**.

III-3 Le vent

L'étude des vents est indispensable pour la réalisation des ouvrages d'art et dans le domaine de l'irrigation, il convient de connaître leur répartition mensuelle, leur vitesse et leur fréquence sans pour autant négliger leur direction.

La vitesse moyenne annuelle des vents varie de 2,7 à 3 m/s le maximum est de l'ordre de 4 m/s

Le vent est généralement faible, d'orientation Nord à Nord Est avec en moyenne 18 jours de sirocco par an.

Le tableau I-4, présente les vitesses moyennes des vents pour une série de mesure des 23 dernières années au niveau de la station de HAMIZ.

Tableau I-4: vitesses des vents (Km/h) à HAMIZ (1987-2010)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
Vent moy (Km/h)	4,93	2,43	3,51	2,30	3,15	2,29	2,12	2,30	2,05	2,32	2,35	2,23

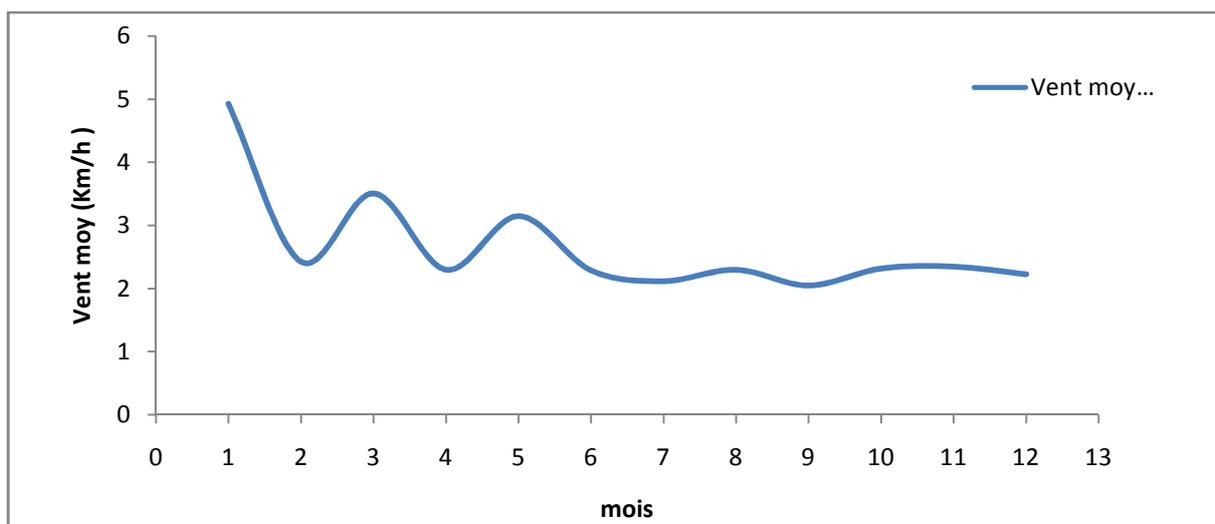


Figure I-5: vitesses des vents (Km/h) à la station HAMIZ (1987-2010).

III-4- Classification du climat

1) Selon la méthode de Martonne

Il permet de connaître le degré de sécheresse de la région

$$I_A = \frac{P}{T + 10}$$

Avec :

I_A : indice climatique

P : précipitation moyenne annuelle (mm)

T : température moyenne annuelle (°C)

A.N:

$$I_A = \frac{603,418}{17,98 + 10} = 21,56 \qquad I_A = 21,56$$

Tableau I-5 : Limite des climats d'après l'indice climatique de Martonne

Valeur de I_A	Type de climat	Irrigation
$I_A \leq 5$	Désertique	Indispensable
$5 < I_A \leq 10$	Très sec	Indispensable
$10 < I_A \leq 20$	Sec	Souvent indispensable
$20 < I_A \leq 30$	Relativement humide	Parfois utile
$I_A > 30$	Humide	Inutile

$I_A = 21,56$ donc $20 < I_A \leq 30$ d'où notre climat est Relativement humide vers Sec.

2) Selon le diagramme d'Emberger

Ce dernier est basée sur l'étude de la végétation méditerranéenne et permet de faire correspondre a chaque région un étage bioclimatique, cela consiste à calculer le quotient d'Emberger qui s'exprime par la formule :

$$Q = 2000 \frac{P}{(M^2) - (m^2)}$$

Avec :

P : précipitation moyenne annuelle (mm)

M : moyenne des températures maximales (Kelvin)

m : moyenne des températures minimales (Kelvin)

$$M = 36 + 273 = 309 \text{ K}$$

$$m = 3 + 273 = 276 \text{ K}$$

$$Q = 2000 \frac{603.418}{(309)^2 - (276)^2} = 62.51$$

On reporte les valeurs du quotient pluviométrique (Q) en ordonnée et les minima du mois le plus froid en abscisses (Annexe). On lit directement l'étage bioclimatique correspondant à la région. Pour la plaine de la Mitidja, nous avons trouvé un quotient : Q=62,51 pour (P= 603,418mm ; M=36 ; m= 3).

Le report de Q et de m sur le climato_gramme d'Emberger permet de caractériser la Mitidja par un climat Sub humide mais tend de plus en plus vers le semi aride.

III-5- Bilan hydrique

Connaître le bilan d'eau d'une région c'est évaluer la répartition des précipitations entre les différentes composantes du bilan hydrique à savoir l'écoulement, l'infiltration et l'évaporation.

Dans ces conditions le calcul de bilan hydrique passe par deux étapes :

- Calcul de l'évapotranspiration (ETR et ETP) ;
- Establishment du bilan hydrique.

III-5-1 Etude de l'évapotranspiration

C'est le terme le plus important du bilan hydrologique après les précipitations, mais elle est difficile à estimer car elle englobe l'ensemble des phénomènes d'évapotranspiration directs par retour dans l'atmosphère à partir des réservoirs de surface (lacs, mers,.....), et souterrains (aquifères) ainsi que par la transpiration des plantes.

On a un nombre de facteurs qui sont essentiels pour l'évapotranspiration; tels que :

- La température.
- L'humidité de l'air.
- Le rayonnement solaire.
- Le vent.
- La pression atmosphérique.

L'absence de bac évaporométrique, nous amène à estimer ce paramètre à partir des formules empiriques.

En effet, on a deux types d'évapotranspirations.

- L'évapotranspiration potentielle.
- L'évapotranspiration réelle.

III-5-1 -1 Étude de l'évapotranspiration potentielle :

Elle correspond à la quantité d'eau maximale qui pourrait s'évaporer au niveau d'un sol, ce dernier est suffisamment approvisionné en eau et sous des conditions climatiques.

- La formule de Thornthwaite.
- La formule de Serra.

a) La formule de Thornthwaite :

Elle est très employée, car elle n'exige en dehors de la latitude de la station, que la température moyenne mensuelle.

$$\text{ETP} = 16 (10T / I)^a$$

Avec : $I = \sum_{i=1}^{12} i$ Où $i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514}$

Et $a = \frac{1.6}{100} I + 0.5$

Où I : Indice thermique annuel.

i : Indice thermique mensuel.

t : température moyenne mensuelle du mois considéré en °C.

K : coefficient d'ajustement mensuel en fonction du mois et de latitude.

Et $ETP_c = ETP \cdot K$

Tel que ETP_c : c'est l'ETP corrigée (mm)

Les résultats de l'E.T.P obtenus par la formule de Thornthwaite sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau I-6 : calcul de l'ETP à la station de HAMIZ (1987-2010) par la formule C.W.Thornthwaite.

Paramètres	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Moy annuelle
Tmoy (°C)	24,2	20	16	13	11	12	13,2	15	18	22	25	26,3	17,98
K	1,03	0,97	0,86	0,84	0,87	0,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	
i	10,88	8,15	5,81	4,24	3,29	3,76	4,34	5,27	6,95	9,42	11,43	12,34	
a	1,87	1,87	1,87	1,87	1,87	1,87	1,87	1,87	1,87	1,87	1,87	1,87	
I	85,95	85,95	85,95	85,95	85,95	85,95	85,95	85,95	85,95	85,95	85,95	85,95	
ETP (mm)	110,87	77,62	51,14	34,68	25,37	29,86	35,69	45,32	63,74	92,77	117,82	129,53	
ETC (mm)	114,19	75,29	43,98	29,13	22,08	25,38	36,76	49,86	77,13	113,18	146,09	150,26	883,37

La valeur de l'E.T.P annuelle trouvée est de 883,37 mm pour un indice thermique annuel $I=85,95$ et $a=1,87$.

D'après le tableau précédant, on remarque une augmentation des valeurs de l'ETP à partir du mois de Mai pour atteindre les plus fortes valeurs au mois d'Août, cela est dû à l'intensité du rayonnement solaire durant cette période de l'année.

De plus on constate une diminution des mesures à partir du mois d'Octobre jusqu'à Janvier.

Les valeurs de l'E.T.P sont largement supérieures aux précipitations.

b) La formule de Serra:

Ce dernier a repris la formule de Thornthwaite avec une approximation largement suffisante aux expressions.

$$ETP = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a$$

Avec : $I = \sum_{i=1}^{12} i$ Où $i=0.09 t$ et $a = 1.6 \left(\frac{I}{100} \right) + 0.5$

Où : t : Température moyenne mensuelle (°C).

I : Indice thermique annuel.

i : Indice thermique mensuel.

Les valeurs de l'E.T.P sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau I-7 : Calcule de l'ETP à la station de Hamiz (1987-2010) par la formule de Serra.

	Sep	Oct.	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Moy annuel
t (°C)	24,8	17,1	14,1	11,4	10,7	12,8	14,5	18,3	19,6	24,7	28,6	29,4	18,83
E.T.P (mm)	124, 96	106, 67	88,6 4	74,6	64,9 4	69,8 1	75,56	84,01	97,74	115,45	128,37	133,89	1164,64
K	1,03	0,97	0,86	0,84	0,87	0,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	-
ETC (mm)	128, 7	103, 47	76,2 3	62,6 7	56,5	59,3 4	77,82	92,41	118,26	140,85	159,18	155,31	1230,76

K : représente un facteur de correction, il est fonction du Mois et de la latitude du point considéré.

Nous obtenons ainsi une évapotranspiration potentielle $E.T.P = 1230,76\text{mm}$ pour un indice thermique annuel $I = 19,413$.

D'après les tableaux I-6 et I-7 on remarque que :

- Les valeurs de l'E.T.P sont largement supérieures aux précipitations.
- Des valeurs importantes de l'E.T.P mensuelles de juin à septembre, les mois de décembre et de janvier sont représentés par des valeurs relativement faibles.

III-5 -1 -2 Etude de l'évapotranspiration réelle

L'évapotranspiration réelle correspond à la quantité d'eau effectivement évaporée et transpirée par l'action biologique. Elle est calculée à partir des formules empiriques qui utilisent les données de températures et de précipitations dont nous disposons.

La détermination du paramètre ETR s'est basée sur trois méthodes, à savoir :

- La méthode de Turc.
- la méthode de Coutagne.
- la méthode de WUNDT.

1) Formule de TURC

Selon Turc, l'E.T.R est fonction de la précipitation moyenne annuelle (P) du bassin versant et d'un paramètre L, lui-même fonction de la température moyenne annuelle (t) du bassin versant. Avec : $ETR \leq P$

La formule de Turc est applicable à tous les climats, elle s'écrit sous la forme :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Avec : P : Pluviométrie moyenne annuelle en mm.

t : température moyenne annuelle (°C).

$$L = 300 + 25t + 0.005t^3$$

E.T.R : évapotranspiration réelle (mm/an).

Tableau I-8 : l'évapotranspiration réelle E.T.R selon Turc

paramètres	t (°C)	L	P (mm)	E.T.R
Région				mm
<i>Mitidja Est</i>	17,98	778,56	603,418	492,58

2) Formule de COUTAGNE

Cette formule donne l'évapotranspiration réelle du bassin versant en fonction de la précipitation moyenne P (m) et de la température moyenne annuelle t (c°).

Avec : $E.T.R = P - \lambda P^2$ tel que : $\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14T}$

Cette formule n'est appliquée à une région donnée que si :

Pour notre cas nous avons :

$$\left\{ \begin{array}{l} t=17,98^{\circ}\text{C} \\ \lambda =0.3 \\ P=0.603418 \text{ m} \end{array} \right.$$

Cette formule n'est applicable que si la condition suivante est satisfaite :

$$\frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{2\lambda}$$

« P » étant compris entre 0.42 et 1.66, la formule de Coutagn s'applique parfaitement à notre Bassin versant

Tableau I-9: l'évapotranspiration réelle E.T.R selon Coutagne.

Paramètre Région	t (°C)	λ	P (mm)	E.T.R (mm)
Mitidja est	17,98	0,3	603,418	507,09

3) Méthode de WUNDT:

Elle est fonction de la température. Son illustration se fait graphiquement en utilisant l'abaque de Wundt (Annexe). Nous obtenons ainsi une ETR égale à 500 mm.

Tableau I-10 : l'évapotranspiration réelle E.T.R selon WUNDT

Paramètre	t (°C)	P (mm)	E.T.R
Région			(mm)
Mitidja Est	17,98	603,418	500

▪ **Discussion des résultats de l'évapotranspiration réelle ETR :**

Les résultats obtenus de l'évapotranspiration réelle (E.T.R) par les trois méthodes sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau I-11 : Résultats de l'E.T.R obtenu par les trois méthodes

Méthode	TURC	COUTAGNE	WUNDT	Moyenne
ETR (mm)	492,58	507,09	500	499,89

Nous constatons que les valeurs de l'ETR obtenues par les différentes méthodes, citées ci-dessus, sont assez proches, Nous retenons pour le calcul du bilan hydrologique, la méthode de Turc qui s'applique à tous les climats avec E.T.R= 492,58 mm (proche de la moyenne), les deux autres méthodes s'appliquent généralement pour des climats humides.

III-5-2 Estimation du bilan hydrologique

1) Estimation de la lame ruisselée :

Le ruissellement est estimé à partir des débits journaliers récupérés au niveau des stations hydrométriques, mais, la mauvaise qualité des données et l'arrêt complet de certaines stations hydrométriques nous contraint à utiliser la formule ci-dessous qui permet d'évaluer la lame ruisselée à partir de la lame précipitée P (mm) et l'ETP, (Tixeront Berkaloff).

R: Lame ruisselée (mm).

P: Lame précipité (mm)

ETP: Evapotranspiration (mm)

$$R = \frac{P^3}{3.(ETP)^2}$$

Tableau I-12: Résultats d'évaluation de la lame ruisselée

La région d'étude	P moy (mm)	ETP moy (mm)	R (mm)
Mitidja Est	603,418	883,37	93,85

$$R=93,85(mm)$$

2) Estimation de la lame infiltrée

L'infiltration est évaluée à partir de l'équation du bilan ci-dessous;

$$P = E.T.R + R + I \pm \Delta S$$

Où : P : Précipitation moyenne annuelle (mm),

ETR : Evapotranspiration réelle (mm),

R : Ruissellement moyen annuel (mm),

I : Infiltration moyenne annuelle (mm).

ΔS : La variation des réserves.

Ainsi, nous pouvons déduire la valeur de l'infiltration (I) à partir de l'équation du bilan hydrologique;

$$\text{Tel que : } I = P - E.T.R - R$$

Tableau I-13 : Résultats de calcul de la lame infiltrée.

La région d'étude	P moy (mm)	ETR moy (mm)	R (mm)	Lame infiltrée
Mitidja Est	603,418	499,89	93,85	9,68

3) Résultats du bilan hydrologique

Tableau I-14 : Résultats d'évaluation du bilan hydrologique.

Apports (mm)		Exhaures (mm)				Ecart apport exhaure (mm)
Précipitations	Total des apports	E.T.R	R	I	Total des Exhaures	
603,418	603,418	499,89	93,85	9,68	603,418	0

En effet, les résultats du bilan hydrologique établit montrent que plus de 83% des précipitations, retournent à l'atmosphère sous forme d'évapotranspiration, la lame ruisselée est évaluée à environ 15% des apports totaux et la lame infiltrée ne dépasse pas les 2 % des précipitations.

Introduction :

La géologie est la base de l'hydrogéologie, elle sert à identifier, par des études stratigraphiques et structurales, des formations litho stratigraphiques.

L'alimentation, le stockage et l'écoulement de l'eau souterraine sont imposés, en premier lieu, par la géologie.

Dans ce chapitre, nous allons donner un aperçu géologique sur la région de la Mitidja, en se basant sur la description litho stratigraphiques et l'évolution paléogéographique et tectonique.

II-1- Contexte géologique :

La plaine de la Mitidja est l'un des bassins Néogène de l'Algérie qui a fait l'objet de plusieurs études géologiques, basées essentiellement sur les travaux de Glangeaud et Aymé (1935) et Glangeaud (1932). Cette plaine, siège d'une subsidence continue marquée par des remplissages plio-quadernaire, se situe au Nord du domaine tellien.

Elle est circonscrite par deux blocs positifs :

Au nord, l'anticlinal du Sahel de 270m d'altitude moyenne, bande collinaire côtière. Il est constitué par des roches anciennes surmontées par des terrains tertiaires plissés ;

Au sud, l'Atlas Blidéen, vaste massif montagneux tranchant brusquement la plaine, est constitué d'épaisse séries d'âge Crétacé Paléocène figure II-1.

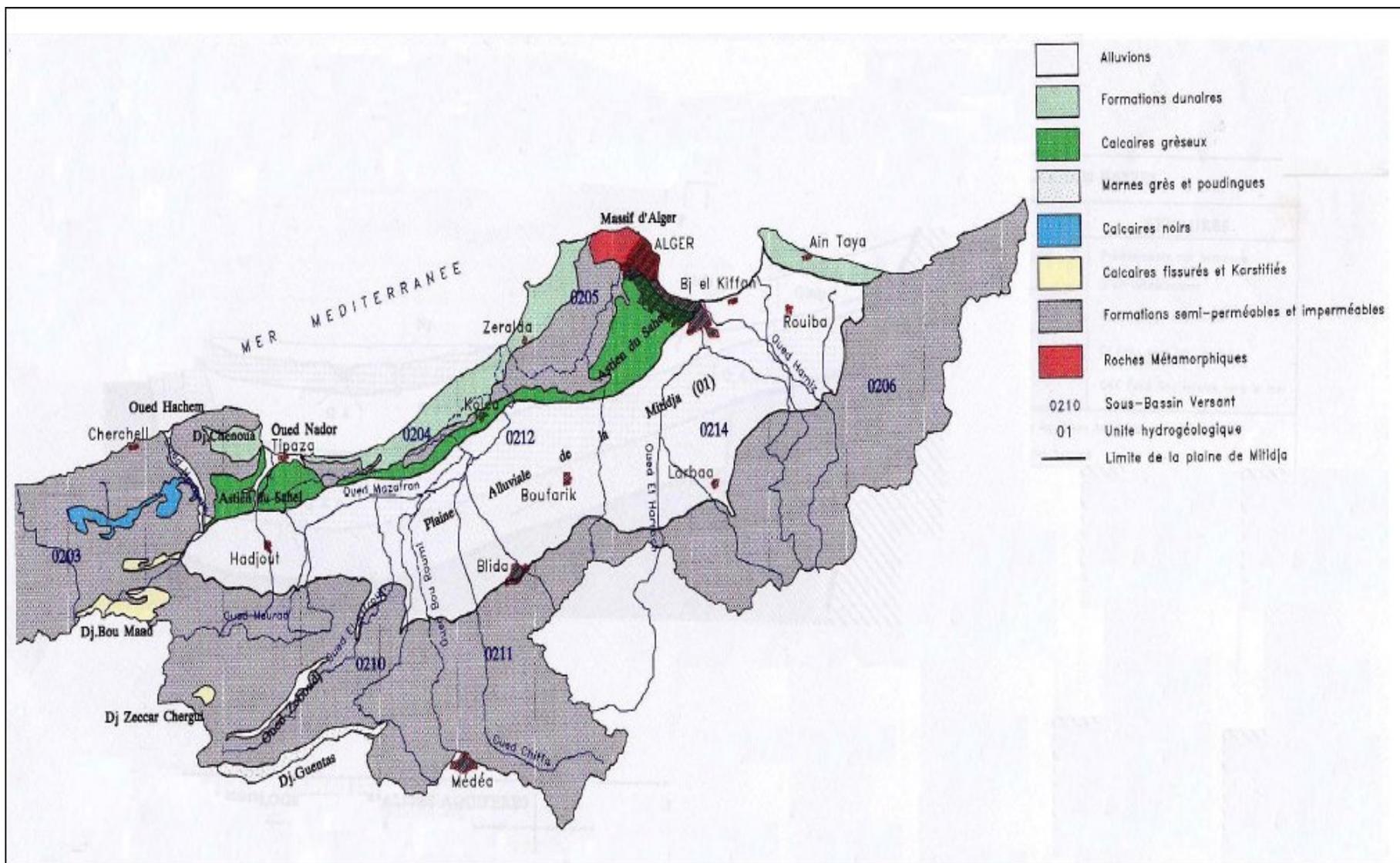


Figure II-1 : Carte géologique de la Mitidja. Bennie and Partners, 1983)

II-2- Stratigraphie et litho stratigraphie :

La configuration et la structure des réservoirs sont imposées par les formations lithostratigraphiques, lesquelles déterminent les formations et les structures hydrogéologiques.

Celles-ci sont la base de l'identification géologique des aquifères.

Une formation litho stratigraphique est constituée par un corps de terrain de nature pétrographique homogène : sable, calcaire, grès, gravier, argile, gypse, etc. Elle est désignée par le nom de la région (ou de la localité) où elle a été observée et décrite ou par un terme d'étage.

II-2-1-Le socle primaire :

Il affleure principalement à Alger et au Chenoua. Il est constitué d'un socle gneissique fortement métamorphique (gneiss ocellé, gneiss fin), surmonté d'une série de schistes satinés faiblement métamorphiques (séricitoschistes et chloritoschistes). Figure II-1.

II-2-2-Le Mésozoïque :

On distingue :

- Les calcaires de l'Oued Sidi El Kebir ; calcaire massif cristallin d'âge Jurassique.
- Les calcaires et grès de la Chiffa d'âge Néocomien et Aptien.
- Les flyschs (marnes et calcaires) d'âge Albien supérieur à Sénonien.

II-2-3-Le Tertiaire:

II-2-3-1-Le Miocène et roches plus anciennes :

Ces formations sont présentes sous le bassin de la Mitidja dans le cœur de l'anticlinal du Sahel et affleurent par endroits dans l'Atlas, sur la bordure Sud du bassin. (Aymé et Al, 1954 ; Glangeaud, 1952).

a-Le Miocène : Le miocène affleure localement dans l'Atlas, plus particulièrement au Sud de Khémis EL Khechna et à l'Est de oued Réghaïa. Il est représenté par des marnes de 50 m d'épaisseur du Vindobonien contenant des lentilles de calcaires, et aussi des lentilles de grès d'épaisseur variable du Burdigalien. (Figure II-3)

b-les formations plus anciennes : elles sont constituées de :

b1- Roches éruptives du Tertiaire : Ces dernières affleurent sur tout le pour tour SW de la Mitidja, où elles se trouvent en contact avec les alluvions récentes du bassin de la Mitidja.

Sur les bordures méridionales et occidentales du bassin, l'existence d'un volcanisme calco-alcalin daté de 11 à 16 Ma, atteste de l'ouverture par effondrement EW du bassin durant le Miocène (Bellon, 1975; Lepvier, 1975 et 1981 ; Ait Hammou ,1981).

D'autres affleurements de roches volcaniques se rencontrent dans la région de Khemis El khechna et Thenia (Rhyolites - Andésites).

b2- Roches métamorphiques :

Elles sont constituées de gneiss de schistes et micas schistes. Elles apparaissent sous forme de petits affleurements isolés au Nord (massif d'Alger, cap Matifou).

II-2-3-2- Le Pliocène :

Deux étages peuvent être individualisés dans le pliocène inférieur, le plaisancien et l'Astien.

II-2-3-2-1- Le Plaisancien :

Il repose en discordance sur les formations du Miocène (Glangeaud ,1952 in Ait Ouali, 2007). Il s'agit d'une formation constituée de niveau fossilifère glauconieux, de marnes jaunes et grises parfois sableuses.

En effet, cela correspond aux sédiments de milieu profond qui se sont déposés sur une surface d'érosion avec une épaisseur moyenne de 200 m. Les affleurements du Plaisancien en surface se rencontrent uniquement dans les collines du Sahel.

Au cœur d'un plissement anticlinal et dans la zone de Khemis El Khechna, Réghaia où ils constituent la fermeture Est du bassin (Rivoirard, 1952 in Ait Ouali, 2007). (Figure II-3)

II-2-3-2-2- L'Astien :

Cette formation se compose de sédiments marins de hauts fonds, qui débute par une couche glauconienne et se poursuit par de la molasse récifale ou sub-récifale. Il se présente sous différents types de faciès :

- Le faciès marno-sableux
- Le faciès grésocalcaire
- Le faciès molassique
- Le faciès gréseux et sableux ; Figure II-2.

II-2-4-Le Quaternaire:

II-2-4-1- Villafranchien (calabrien) : formation d'El Harrach

Cette formation est constituée par une séquence relativement uniforme d'argiles plastiques jaunes ou grises localement, légèrement caillouteuse, contenant un petit nombre de

lentilles de graviers de 2 à 6 m d'épaisseur. Quelquefois, la formation d'El Harrach, en raison de la présence de graviers, a été confondue avec les formations alluviales sus jacentes qui sont essentiellement caillouteuses.

La rareté des forages ayant atteint cette formation fait qu'on a un manque de détails descriptifs. Les argiles sont totalement absentes autour de Rouiba. L'épaisseur moyenne de la formation au centre du bassin est estimée à 100 m et diminue vers le sud.

II-2-4-2- Soltanien-Soltiftien (Tyrrhénien) : formation de la Mitidja

Cette formation est composée principalement d'alluvions grossières (graviers, galets, limons et argiles en quantités variables). Les alluvions de la formation de la Mitidja sont épaisses et sont présentes dans le centre du bassin. Elle est puissante au centre (100 à 200 m) et devenant de plus en plus faible en allant vers les bordures et la baie d'Alger.

II-2-4-3- Le Rharbien –Actuel :

Il est représenté par des sables meubles éoliens ou des sables dunaires épais de 20 à 40 m, de graviers et de couches fossilifères consolidées ou cimentées.

Le piémont de l'Atlas est recouvert de débris anguleux cimentés par une matrice argileuse provenant d'un cône de déjection et d'une solifluxion de matériaux du massif blidéen. Ces débris ne représentent qu'une faible partie du remplissage du bassin de la Mitidja.

Ils regroupent les dépôts de sables dunaires, les dépôts du piémont de l'Atlas Blidéen ainsi que les sables et les graviers provenant des lits des oueds. La baie d'Alger et la région de Réghaia sont bordées par des dépôts marins et des dunes.

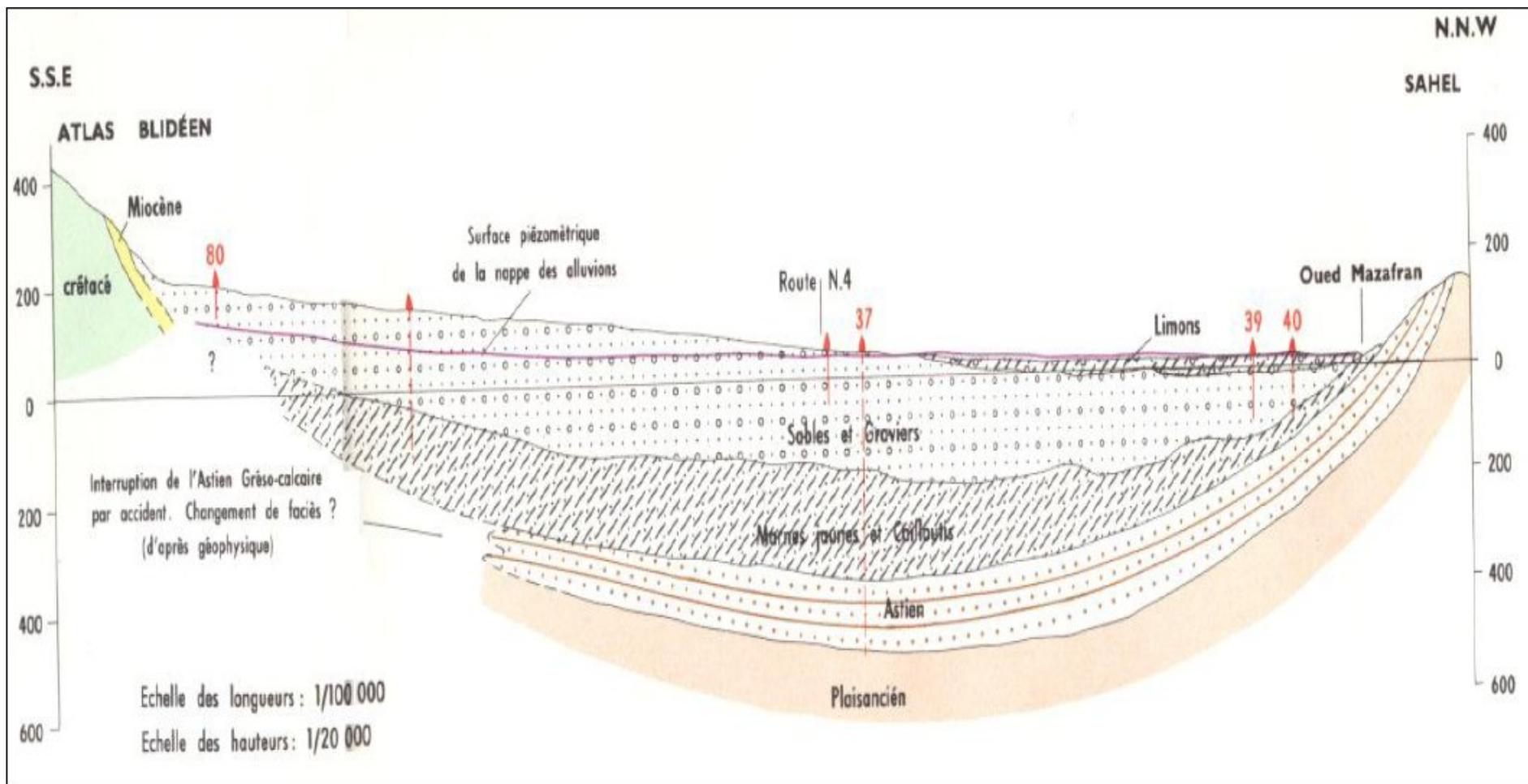


Figure II-2 : Coupe interprétative de la Mitidja dans le bassin de Mazafran (Achie 1971)

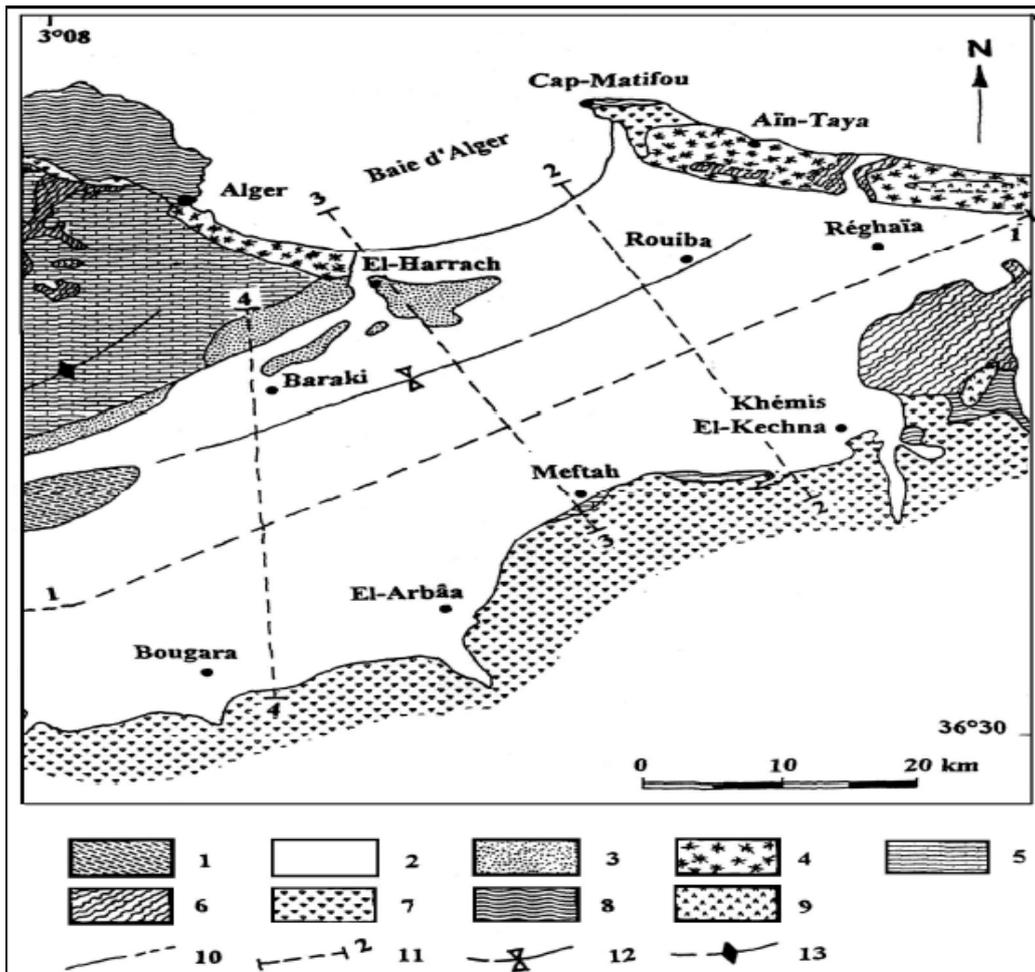


Figure II-3: Carte géologique de la plaine de la Mitidja Est (Mac Donald et Partners, 1992)

Quaternaire : (1) Formation du Mazafran ; (2) Formation de la Mitidja : Alluvions de graviers et d'argiles ; (3) Formation d'El Harrach : argiles et cailloutis (Villafranchien) ; (4) Formation dunaires consolidées, quelques lumachelles, poudingues et grès ;

Pliocène : (5) Astien : Calcaires gréseux, calcaires construits, marnes jaunes, sables ; (6)

Plaisancien : Marnes et argiles bleues ;

Miocène et roches plus anciennes : (7) Roches sédimentaires ; (8) Roches métamorphiques ; (9) Roches éruptives.

(10) Ligne de contact ; (11) Ligne de coupe géologique ; (12) axe synclinal ; (13) Axe d'anticlinal.

Projection MTU. Tirée : Carte hydrogéologique d'Alger (ANRH, 1973)

Conclusion :

Le secteur d'étude représente l'extrémité orientale de la plaine de la Mitidja, siège d'une subsidence continue dont les éléments sont fournis par les unités positives des bordures, de l'Atlas en particulier.

Les principaux évènements géologiques, ayant affecté la plaine de la Mitidja, ont contribué à la formation de deux réservoirs aquifères principaux :

- L'Astien à faciès gréseux, en général d'épaisseur 100 à 200 m.
- Les Alluvions grossières du Quaternaire dont l'épaisseur est en moyenne de 200 m

Ces deux réservoirs sont séparés sur presque toute la surface de la plaine par des marnes jaunes semi-perméables de la formation d'El Harrach (le Villafranchien) sauf à l'Est de l'oued El Hamiz où ils ne constituent qu'un seul aquifère.

Introduction :

L'hydrogéologie est la science de l'eau souterraine. C'est une discipline des sciences de la terre orientée vers les applications.

Comme pour l'hydrologie que l'on peut définir de deux manières : "science de toutes les eaux" et "science qui traite des propriétés spécifiques des eaux", l'hydrogéologie peut être également définie comme étant :

- une science qui concerne la recherche, l'exploitation et la gestion et la protection des eaux;
- une science qui traite des rapports entre l'eau et la roche ou plus précisément qui cherche à connaître l'organisation des écoulements souterrains ;
- Science qui étudie les propriétés physiques et chimiques des eaux souterraines.

Elle applique les connaissances acquises sur la prospection, le captage, l'exploitation et la gestion de l'eau souterraine.

L'hydrogéologie englobe aussi l'hydraulique des eaux souterraines, la chimie des eaux souterraines, la géophysique, l'hydrochimie, l'hydrobiologie.....etc.

L'objectif principal de notre étude hydrogéologique dans ce chapitre est d'identifier et de décrire les unités géologiques ayant une importance du point de vue ressources en eau souterraine dans la Mitidja Est, et l'acquisition de données par la prospection ou l'expérimentation sur le terrain, le captage et la planification de l'exploitation de l'eau souterraine.

III-1- Hydrogéologie de la plaine de la Mitidja :**III-1-1- Morphologie et structure des aquifères :**

La plaine de la Mitidja est un bassin alluvial formé par affaissement et sédimentation active.

En effet, cette dernière comporte deux principaux aquifères :

- Astien (calcaire gréseux) : se trouve en charge sous la formation d'El Harrach. Ses caractéristiques hydrodynamiques sont mal connues.
- L'aquifère de la Mitidja : renferme une nappe libre, sauf dans le bas Mazafran où elle est captive. Les transmissivités sont importantes surtout dans la partie Est ($1 \text{ à } 2,3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$) ; les valeurs du coefficient d'emménagement varient de 6 à 7 % (G. CASTANY, 1982).

L'écoulement des eaux de l'aquifère alluvial de la nappe de la Mitidja est orienté du Sud vers le Nord, avec des zones d'apports dans les bordures Sud de la plaine (Atlas) et le long du

Sahel. On a deux exutoires dans la partie aval, l'un à l'Ouest (Cluse du Mazafran) et l'autre à l'Est (baie d'Alger).

III-1-1-1 -L'aquifère de l'Astien :

Généralement présent dans toute la plaine, il affleure sur le bourrelet du Sahel. Cet aquifère intercalé dans des grès fins consolidés s'enfouit rapidement dans la plaine à une profondeur de 200 à 400 m.

Cet horizon est continu dans la région d'El Harrach – Hamiz, son épaisseur (150m dans la région d'El Harrach), diminuant vers le Sud-est (15 à 30m seulement. Il est généralement captif avec des niveaux piézométriques justes au dessus du sol. Il est probablement libre dans les zones d'affleurement de l'Astien dans le Sahel (Bennie et Partners, 1992).

Au cours des trente dernières années, peu de forages ont été effectués assez profondément pour intercepter l'aquifère captif Astien, c'est pour cela qu'il n'existe aucun historique piézométrique enregistré à partir d'un forage crépine seulement dans l'Astien ; par conséquent, il n'est pas possible de savoir comment la piézométrie de l'Astien a évolué en fonction du temps et de l'accroissement du prélèvement d'eau à partir de l'aquifère de la Mitidja.

III-1-1-2- Aquifère de la Mitidja :

Deux petites unités géologiques ont été regroupées avec la formation de la Mitidja dans le concept d'aquifère de la Mitidja.

Ce sont les sables dunaires récents, qui longent la baie d'Alger et les alluvions récents des lits d'oueds. Ces deux unités sont composées de matériaux apparentés avec la formation de la Mitidja.

L'aquifère de la Mitidja occupe toute la superficie du bassin de la Mitidja, sauf sur la partie Ouest au-delà de Ameer el Ain et dans quelques zones localisées en bordure du bassin, entre Baraki et El Harrach. Le réservoir de la Mitidja se compose essentiellement de graviers et de galets alternants avec des limons et argiles.

Son épaisseur est de 100 à 200 m sur la majeure partie de la plaine et va en s'amincissant vers le Sud, pour atteindre l'Atlas.

Ses limites sont plus complexes que celles de l'Astien, son substratum se situe au contact des formations marneuses d'El Harrach, sauf à l'Est de la plaine où, c'est l'Astien, qui forme cette limite inférieure. Le toit de l'aquifère, d'une manière générale, est formé par la surface du sol, sauf dans le bas Mazafran où l'aquifère est recouvert et rendu captif par les limons de la formation du Mazafran épaisse de 10 à 60 m.

L'aquifère est limité à l'ouest par les marnes d'El Harrach et la mer, sauf en quelques points où il est en contact direct avec l'Astien.

À l'Est de la baie d'Alger, l'aquifère est isolé de la mer par les formations dunaires consolidées du Sahel.

La limite Est est en partie constituée de marnes du plaisancien, mais l'aquifère est en continuité avec les alluvions de la basse vallée de l'oued Boudouaou.

La limite Sud de l'aquifère est marquée par les formations de l'Atlas blidéen. À ce niveau, l'aquifère de la Mitidja est en général en contact direct avec l'aquifère Astien qu'il recouvre, sauf dans la partie Sud-ouest où l'aquifère recouvre les formations miocènes.

III-1-2- Les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères :

III-1-2-1- L'aquifère Astien :

Il se trouve en charge sous les marnes jaunes semi-perméables d'El Harrach, sauf dans la partie Est où il est en contact direct avec l'aquifère de la Mitidja.

Les caractéristiques hydrodynamiques de l'Astien sont mal connues. Les estimations de la transmissivité indiquées par la société Géo hydraulique (1968-1972), et le bureau d'étude Bennie & Partners (1979-1980) varient de 90 à 2000 m²/jour. Le coefficient d'emménagement estimé à partir des essais de pompage de courte durée (Bennie & Partners 1979-80) est compris entre 5.10⁻⁶ et 5.10⁻³.

III-1-2-2- L'aquifère de la Mitidja :

L'aquifère de la Mitidja renferme une nappe libre, sauf dans le bas Mazafran où la nappe est captive sous les limons récents de la formation du Mazafran(SOGREAH,2008).

Il est caractérisé par des perméabilités verticales inférieures aux perméabilités horizontales à cause des grandes variations que connaissent les matériaux dans le plan vertical en un point donné. La direction préférentielle de l'écoulement est par conséquent horizontale.

Les eaux s'écoulent en général du Sud au Nord. Au centre de la plaine, l'écoulement se fait depuis la bordure de l'Atlas en direction du Nord puis converge vers le bas Mazafran pour s'écouler dans les limons sus-jacents, et vers les oueds.

Dans le bassin d'El Harrach, Hamiz, les écoulements naturels provenant de l'Atlas se dirigent vers les marais de Réghaia, la baie d'Alger et vers les deux aires situées entre Baraki et Dar El Beida.

En général, les valeurs de perméabilités les plus élevées se trouvent dans les matériaux déposées par les grands oueds (oued El Harrach, oued El Hamiz), par contre les valeurs les plus faibles sont situées dans les matériaux provenant du piémont (Atlas Blidéen).

Les valeurs de transmissivités sont très importantes dans la partie Est de la plaine où les deux aquifères sont en contact. Elles dépassent 200 m²/jour, sauf près des bordures les plus minces de l'aquifère et peuvent atteindre 4000 m²/jour (Toubal, 1998).

Les coefficients d'emmagasinement sont mal connus du fait de l'hétérogénéité de l'aquifère à certains endroits. D'une manière générale, ils sont en moyenne de 6 à 7% (Bennie & Partners 1980). A titre d'exemple, ils varient entre 15% (région d'El Harrach - Bordj El Kiffan – Rouiba) et 3% (l'extrême Est de l'aquifère).

III-1-2-3- Aperçu de la surexploitation des aquifères :

La prolifération des forages et de la sécheresse persistante de ces deux dernières décennies ont entraîné des rabattements importants dans certaines régions qui ont pour conséquence la diminution des débits dans les forages (Tableau III-2).

Tableau III-1 : Tableau récapitulatif des points d'eau et des débits extraits réalisés en 1997 Complété en 2001-2002 dans la plaine de la Mitidja

Usages	Nombre d'ouvrages inventoriés		Débits (m ³ /an)	
	Forages	Puits	Forages	Puits
AEP	578	10	144585350,6	25511,58
Irrigation	3172	157	124438806,1	2616907,8
Industrie	162	5	872532,4	17928
Non utilisé	281	/	/	/
Total par type	4193	172	269896689,1	2660347,3
TOTAL	4365		272557036,568	

(Source : ANRH)

III-1-3- Les mécanismes d'alimentation et d'écoulement des nappes :

III-1-3-1- L'aquifère Astien :

Il est limité à la base et sur les bords par les formations peu perméables (marnes et argiles bleues du plaisancier), par conséquent les eaux qu'il reçoit sont celles provenant de :

- **Alimentation :**

- a- L'infiltration des précipitations sur le Sahel où l'astien affleure. Elle est de l'ordre de 25000 m³/jour.

- b- Réalimentation due à la nappe de la Mitidja sus-jacente. (SOGREAH ,2008).

Dans les piémonts de l'Atlas, l'Astien est alimenté par la nappe de la Mitidja par drainance à travers les marnes jaunes de la formation d'El Harrach peu épaisse (aux endroits où il y a des passées caillouteuses et absence de marnes).

- c- Fuite des réseaux de distribution en eau potable de la région d'Alger.

- **Exutoires :**

a- Les fuites latérales de l'Astien le long de la limite Sud du Sahel, bien qu'il soit limité sur les cotés par des formations peu perméables ; un débit important sort à travers ces limites.

b- La mise en charge de l'aquifère peut provoquer certaines percolations verticales privilégiées vers la nappe de la Mitidja à travers les marnes jaunes d'El Harrach (aux endroits de passées caillouteuses dans le bas Mazafran et la basse plaine d'El Harrach).

c- Prélèvements par pompage : plusieurs puits et forages captant l'aquifère Astien soutirent des quantités d'eau considérables. Ils sont situés dans les affleurements qui longent la bordure Sud du Sahel et au Sud d'Alger.

III-1-3-2-L'aquifère de la Mitidja :

L'aquifère de la Mitidja est en relation hydraulique avec certaines formations saturées, qui s'étendent en dessous ou sur les côtés, ce qui donne lieu aux écoulements suivants :

- **Les apports :**

a- l'infiltration des précipitations tombant sur la plaine ; elle a été estimée à 21100 m³/jour par Bennie & Parners 1978-1980.

b- La réalimentation par les oueds : la plaine est traversée par des oueds ayant une interaction avec l'aquifère de la Mitidja.

L'infiltration se produit dans les cours d'eau supérieurs de tous les oueds, sauf l'oued Réghaia.

La réalimentation moyenne globale résultant des grands oueds durant la période 1970-1971 et 1979-1980 a été estimée à 19700 m³/jour.

La part de chacun des oueds dont la réalimentation varie considérablement :

Oued Djemaà 21%, Oued Chiffa 21% et Oued El Harrach 52% représentant la part la plus importante.

La différence de la réalimentation entre ces oueds est due à la côte des oueds par rapport au niveau piézométrique et à la perméabilité des couches des lits d'oueds.

c-La réalimentation par les écoulements verticaux de l'Astien vers la nappe de la Mitidja.

d-La réalimentation par les écoulements des eaux souterraines de l'Atlas : ces écoulements d'eaux souterraines ont été mis en évidence par des analyses chimiques des eaux (Bennie & Partners 1978-1980).

e-Infiltration des eaux d'irrigation excédentaires : Agrocomplect en 1978 a évalué le débit d'eau d'irrigation à 68000m³/j qui réalimente la nappe, en supposant que 10% des prélèvements d'eaux souterraines pour l'irrigation s'infiltrant en profondeur.

f-La réalimentation par distribution en eau potable et par les eaux usées.

g-La réalimentation par les petits flux à travers les limites de l'aquifère : elle comprend les flux provenant du bassin versant du cours d'eau supérieur de l'oued Réghaia et les petits flux arrivant des formations de Halloula et d'El Harrach.

- **Les exhaures et les pertes de l'aquifère de la Mitidja :**

Elles sont assurées par :

a- La fuite souterraine, surtout vers l'Astien : dans les piémonts de l'Atlas, l'aquifère de la Mitidja alimente l'Astien sous-jacent et cela par drainance à travers les marnes jaunes d'El Harrach.

b- Fuite vers la baie d'Alger.

c- Drainage vers les oueds dans leur cours aval.

d- Écoulement dirigé de la nappe de la Mitidja vers les limons de la formation de Mazafran par drainance à travers la couverture semi-perméable.

e- Les prélèvements dans les puits et forages de la plaine : la presque totalité des prélèvements en eau souterraine provient de l'aquifère de la Mitidja, où plus de 4000 puits et forages assurent l'alimentation en eau potable, industrielle et d'irrigation de toute la région.

III-1-4- Bilan entrant et sortant des aquifères :

III-1-4-1- Bilan d'eau de la nappe de l'Astien :

Le bilan de la nappe de l'Astien n'est pas parfaitement connu, vu que les prélèvements et la réalimentation ne sont pas bien estimés.

Les éléments connus du bilan d'eau sont donnés dans le (tableau III-3).

Tableau III-2 : Bilan d'eau de la nappe de l'Astien

DESIGNATION	DEBITS ENTRANTS		DEBITS SORTANTS	
	m ³ /jour	hm ³ /an	m ³ /jour	hm ³ /an
-Échange avec l'aquifère de la Mitidja	35000	12,8	57000	20,8
- Débits sortants le long de la limite Sud du Sahel.	-	-	41000	15,0
-Réalimentation directe par les eaux de pluie	25000	9,1	-	-
-Fuite des réseaux de distribution en eau potable d'Alger	37000	13,5	-	-
Total	97000	35,4	98000	35,8

III-1-4-2- Bilan d'eau de la nappe de la Mitidja :

Dans les conditions climatiques moyennes, la réalimentation de la nappe est inférieure aux débits sortant de la nappe. Cette situation existe depuis la concentration des prélèvements par

le champ captant de Mazafran I réalisé à la fin de 1970. Par conséquent, la nappe n'est pas en équilibre hydraulique. Entre 1970 et 1981, les niveaux piézométriques ont baissé de 10 m et plus en certains secteurs.

Le total des débits sortants de la nappe de 1979/1980 était de 90000 m³/jour soit 328 hm³/an.

Ce chiffre se décompose de la manière suivante (tableau III-4).

Tableau III-3 : Débits entrants de la nappe de la Mitidja

DESIGNATION	DEBITS ENTRANTS		
	m ³ /jour	hm ³ /an	% du total
-Apports souterrains d'autres formations surtout l'Astien et les formations de l'Atlas.	172000	63	19,1
-Réalimentation directe par les précipitations	211000	77	23,4
-Réalimentation par les oueds et bassins versants périphériques	374000	136	41,5
-Infiltration des eaux d'irrigation excédentaires	69000	136	7,7
-Fuite des réseaux de distribution en eau potable et des eaux usées.	59000	22	6,6
-Réalimentation depuis les limons de Mazafran	15000	5	1,7
-Total	900000	328	100

Le total des débits sortants de la nappe de 1979/1980 était de 916000 m³/jour soit 335 hm³/an. Ce chiffre se décompose de la manière suivante (tableau III-5).

Tableau III-4 : Débits sortants de la nappe de la Mitidja

DESIGNATION	DEBITS SORTANTS		
	m ³ /jour	hm ³ /an	% du total
Débits souterrains sortant vers l'Astien et vers la mer	46000	17	5,0 7,1
Drainage vers les oueds et vers la nappe des limons de la formation de Mazafran	65000	24	
Prélèvements :			
-eau potable	388000	142	42,4
-eau agricole	345000	126	37,7
-eau industrielle	57000	21	6,2
-autres	15000	5	1,6
Total	916000	335	100

NB : les tableaux (III-3, III-4, III-5) sont extraits des documentations de l'ANRH de Blida.

III-2- Etude piézométrique :

Le premier inventaire partiel des points d'eau a été réalisé en 1974 par l'agence nationale des ressources hydraulique (ANRH). Cet inventaire a été complété en 1991.

Depuis juin 1993, un réseau piézométrique a été sélectionné pour le suivi de la nappe alluviale.

Ce réseau fait l'objet de deux campagnes de mesure du niveau statique durant la période 1993-1994.

Depuis, le suivi de cette nappe a été interrompu pour des raisons sécuritaires pour être repris en 2003.

- Une bonne répartition spatiale des points sur toute l'étendue de la plaine.
- Possibilité de mesure et de prélèvement.

Dans le cadre de la surveillance de la fluctuation des eaux souterraines, l'ANRH a retenu des points de mesures constitués de puits, de piézomètres et de forages non exploités. Ces points d'observation forment le réseau piézométrique de la nappe alluviale de la Mitidja.

Ce réseau fait l'objet de deux campagnes de mesures par an (une campagne en période des basses eaux et une autre en période des hautes eaux). Cela permet d'assurer un suivi des fluctuations de la surface piézométrique de la nappe de la Mitidja dans l'espace et dans le temps.

III-2-1-Cartes piézométriques :

a)-Carte piézométrique de la Mitidja (Avril, 2010) :

La carte piézométrique figure (III-8) illustre un écoulement des eaux de l'aquifère alluvial du Sud vers le Nord, les gradients hydrauliques diminuent en aval, avec des zones d'apports dans les bordures Sud de la plaine (Atlas) et le long du Sahel.

On remarque dans la partie sud que les isopièzes sont parallèles à l'Atlas, ce qui suggère une zone de contact hydraulique. Vers la partie Nord, ces isopièzes s'incurvent pour mettre en évidence la convergence des écoulements vers les principaux exutoires de l'aquifère : Bordj El kiffan, champs de captage de Baraki.

Dans la région de Rouiba, El Hamiz et Dar El Beida, les courbes hydroisohypses sont très espacées, traduisant une zone de très bonne perméabilité confirmée par la lithologie locale et la géométrie de la formation. C'est dans cette région qu'il y a un contact entre les deux aquifères (Astien et de la Mitidja).

b)-Carte piézométrique de la Mitidja (Octobre, 2010) :

La carte piézométrique figure III-9 illustre un écoulement des eaux de l'aquifère alluvial du Sud vers le Nord, mais au niveau de la Baie d'Alger, il y a une inversion du sens d'écoulement de la mer vers le continent. Malgré les précipitations intenses qu'a connues la région ces dernières années, le niveau de l'eau est descendu jusqu'à -17m.

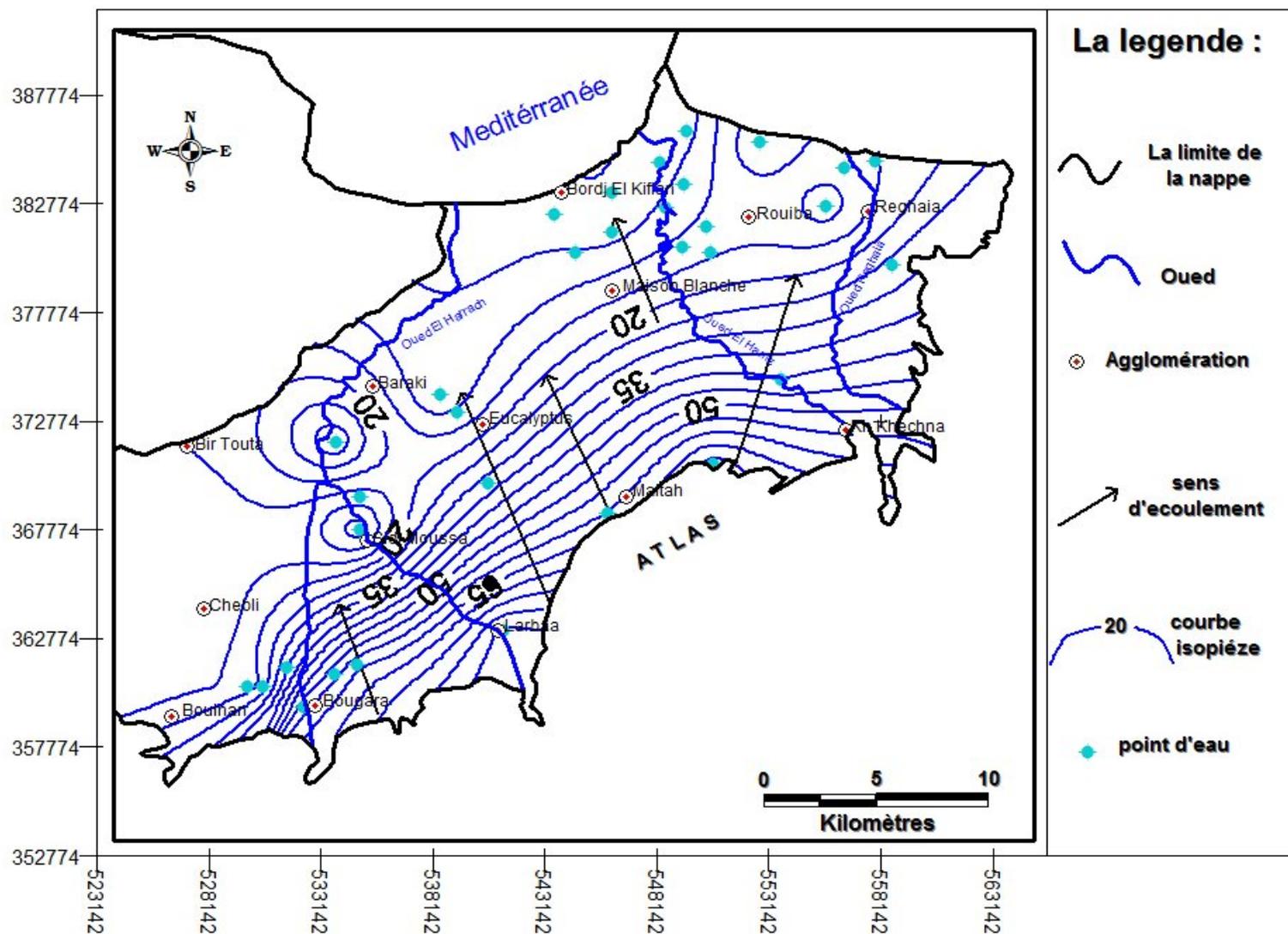


Figure III-1 : Carte piézométrique des hautes eaux de la nappe alluviale de la Mitidja Est (Avril, 2010)

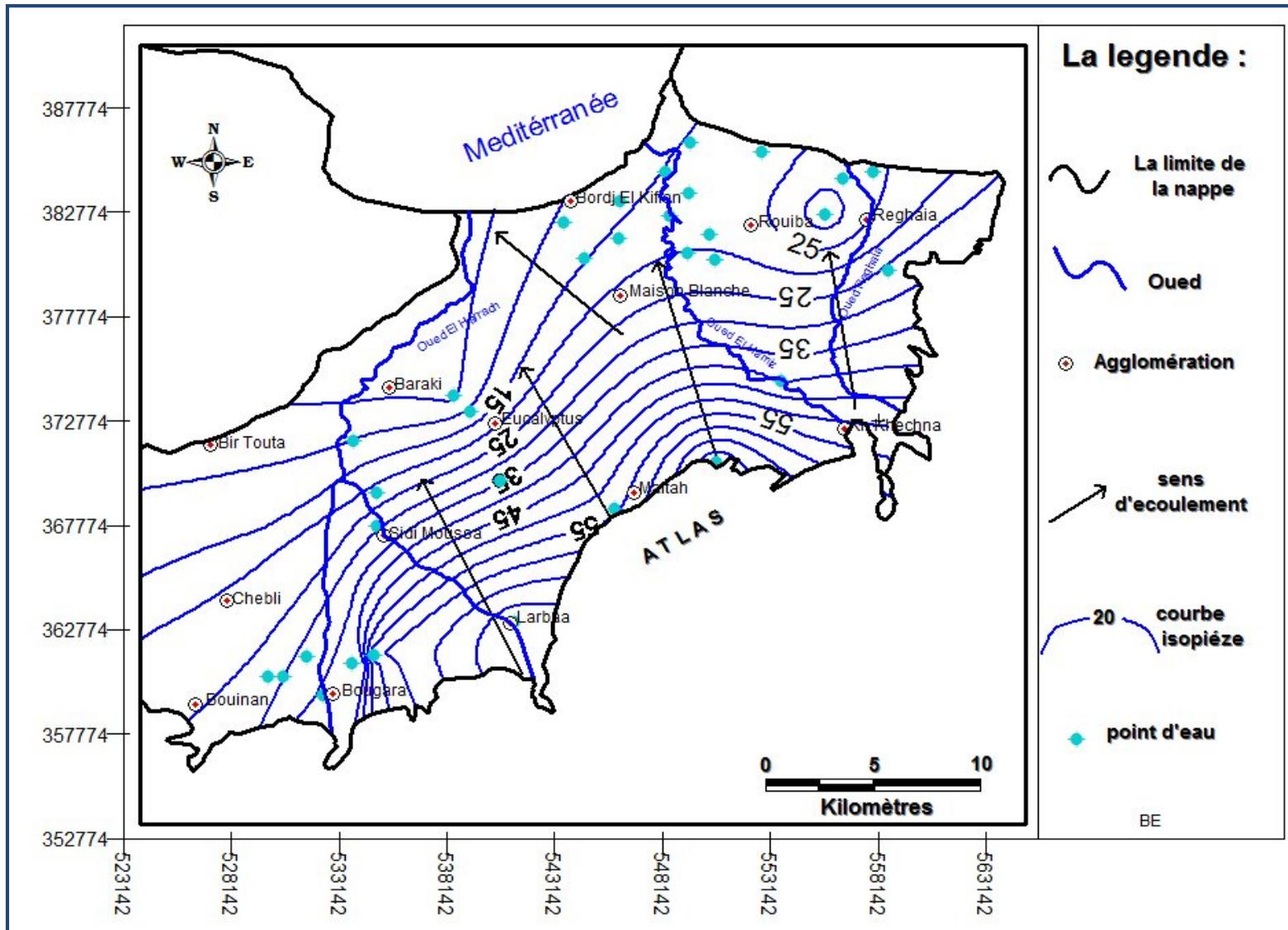


Figure III-2 : Carte piézométrique des basses eaux de la nappe alluviale de la Mitidja Est (Octobre, 2010)

La formation de vastes zones dépressionnaires, à l'Est de Oued El Harrach ainsi que dans la région de Rouiba est sans aucun doute liée à l'accroissement des débits de pompage. La dépression d'El Harrach, bien soulignée par la courbe d'égale niveau d'eau, est centrée sur les champs de captage les plus importants de la Mitidja.

La dépression piézométrique de Rouiba matérialisée par la courbe 0 se développe autour des centres de pompage du Hamiz et de Dar El Beida

Le gradient hydraulique au sud égale a 0.0055 par contre au nord égale 0.0024

III-2-1-2- Fluctuation de la surface piézométrique dans le temps :

Dans le cadre de la surveillance périodique de la fluctuation des eaux souterraines de la nappe de la Mitidja, deux campagnes de mesures de niveau de la profondeur de la nappe sont effectuées chaque année (période des hautes eaux et période des basses eaux).

Pour illustrer l'évolution dans l'espace et dans le temps du niveau piézométrique au cours de ces dernières années, des graphiques sont établis

On remarque une diminution du niveau de la nappe en septembre 2003, septembre 2004, et en septembre 2005 c'est-à-dire dans la période des basses eaux. Cela est dû au manque de précipitations et aux pompages excessifs durant la période estivale.

Le faible rabattement enregistré durant les dernières années (2007 et 2010) est le résultat de l'arrêt du pompage due à la pollution par les hydrocarbures et l'uniformité des précipitations qui a atteint 603.42mm/mois durant l'année 2010, mais la surface piézométrique est abaissée jusqu'à -17m en octobre 2010 dans les point (W042-999, W042-1010) (ANRH 2010).

Cette baisse de la surface piézométrique est matérialisée par un cône de dépressions qui se manifeste au niveau des principaux champs de captages, la conséquence de plusieurs facteurs à savoir :

- Longue période de sécheresse (deux dernières décennies)
- Importante prolifération des ouvrages .Le nombre de forages inventoriés a pratiquement triplé dans un intervalle de 37 ans .Il est passé de 1492 en 1970 pour atteindre 4193 en 1997 selon les chiffres de l'ANRH.

IV- Conclusion

La plaine de la Mitidja comporte deux principaux aquifères : celui de l'Astien et celui de la Mitidja séparées par la formation d'El Harrach, sauf dans la partie Est où ils sont en contact direct.

L'aquifère de l'Astien (calcaire - gréseux) se trouve en charge sous la formation d'El Harrach. Ses caractéristiques hydrodynamiques sont mal connues.

Les niveaux piézométriques baissent constamment, donc surexploitation de la nappe, provoquant la rupture de l'équilibre physique entre l'eau douce et l'eau salée, ce qui accentue l'avancé de la langue d'eau salée vers le continent .

Cela est matérialisé par une inversion du sens d'écoulement de la mer vers la plaine pour atteindre -17m dans la période des basses eaux en 2010 dans les points (W042-999, W042-1010).

Introduction

L'étude hydrochimique de la nappe de la Mitidja Est a été entreprise afin de mieux comprendre les mécanismes d'alimentation de l'aquifère. La connaissance détaillée de la chimie des eaux de la nappe permettra également de mieux les utiliser en particulier en irrigation et en alimentation en eau potable.

A cet égard, l'ANRH effectue des prélèvements d'échantillons d'eau .

IV-1- Analyse des données chimiques

L'objet de cette étude , est de dresser un bilan sur l'état actuel de la qualité chimique des eaux souterraines . Cette approche fondée sur l'analyse des échantillons prélevés par l'équipe de l'ANRH (Blida) en hautes et basses eaux 2010, permet d'abord une analyse globale des eaux avant l'examen des différents facteurs qui peuvent avoir une influence sur le chimisme de la nappe et l'établissement des différentes cartes (faciès chimiques, potabilité, conductivité).

Les analyses chimiques ont été effectuées au niveau du laboratoire de l'ANRH de BLIDA ,et ont porté principalement sur les éléments majeurs à savoir :

Cation :Ca⁺⁺,Mg⁺⁺,Na⁺,K⁺.

Anion :Cl⁻,So4⁻,HCO3⁻,CO3⁻,NO3⁻ :mer méditerranée.

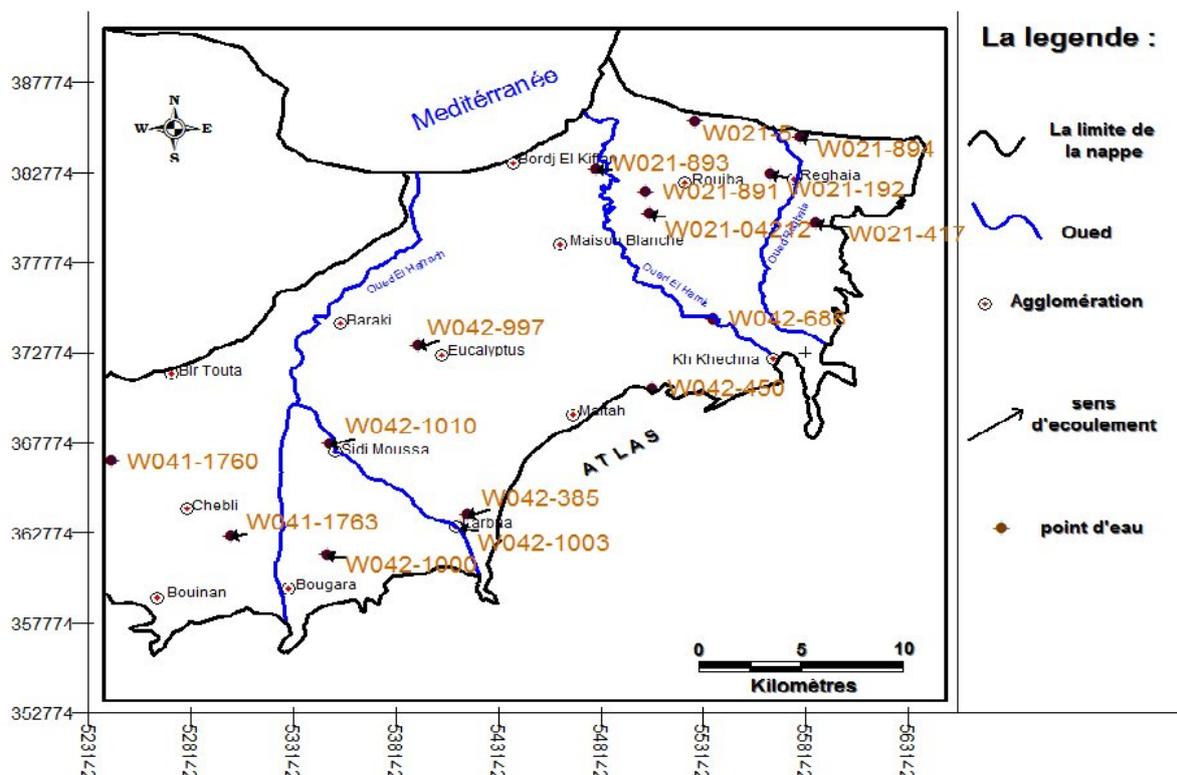


Figure IV-1 :Situation des points d’eaux de la Mitidja Est

IV-1-1- Analyse des caractéristiques physico- chimiques :

IV-1-1-1-Paramètres physiques :

a- Le potentiel d'hydrogène(pH) :

Le pH (potentiel Hydrogène) mesure la concentration en ions H⁺ de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14, 7 étant le pH de neutralité. Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique et dépend de facteurs multiples, dont l'origine de l'eau. Il doit être impérativement mesuré sur le terrain à l'aide d'un pH-mètre ou par colorimétrie. Le schéma suivant montre la variation des PH suivant les points d'eaux étudiées.

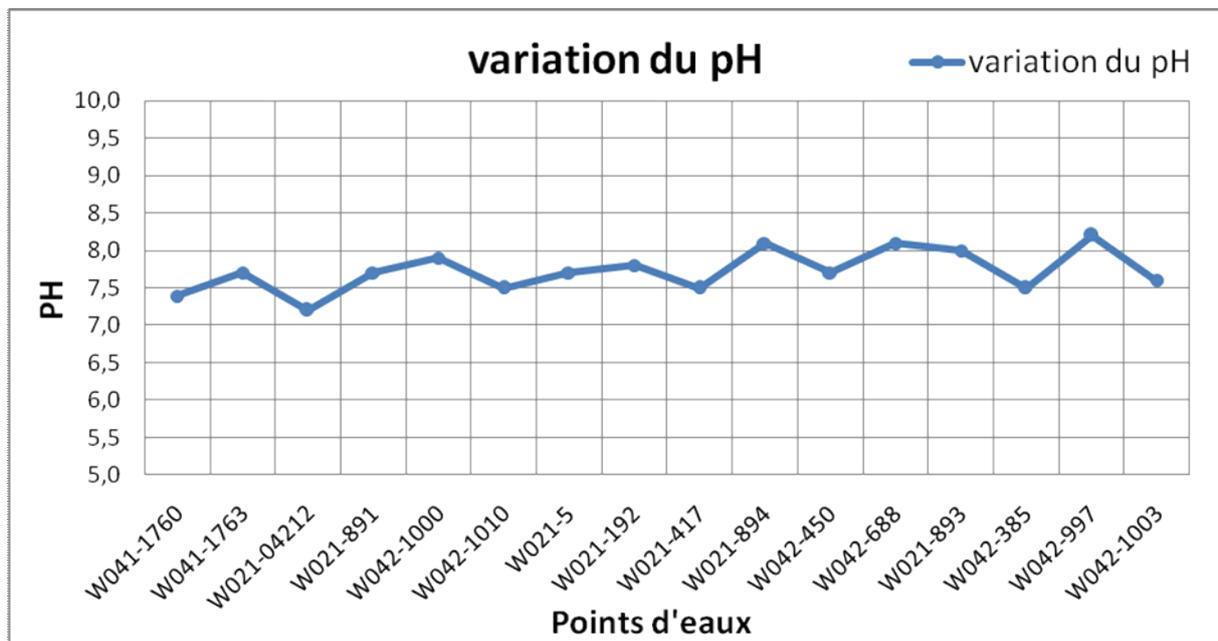


Figure IV-2 : Domaine de variation du pH des échantillons analysés
(Campagne: Avril, 2010)

On remarque que :

Les valeurs de pH mesurées sont généralement supérieures à 7.0 ;

- La valeur moyenne calculée sur 18 points d'eau est de 7.7 ;
- La valeur minimum est de 7.2 qui correspond au point d'eau W021-04212.
- La valeur maximum est de 8.2 qui correspond au point d'eau W042-997.

b- La conductivité électrique

Elle exprime la propriété de l'eau à conduire le courant électrique, donc traduit sa teneur en sels dissous.

Elle permet d'évaluer globalement la teneur de l'eau en sel dissous et permet donc une bonne appréciation des matières en solution.

Pour l'eau potable, les valeurs élevées de la conductivité sont mauvaises pour la consommation, l'OMS a fixé 1500 $\mu\text{s}/\text{cm}$ comme valeur limite de la conductivité admissible dans l'eau de boisson. Pour les usages agricoles, l'eau peut poser un problème au-delà de 750 $\mu\text{s}/\text{cm}$. L'appréciation de la conductivité d'une eau permet donc de qualifier sa minéralisation. (voir figure IV-3)

b-1 Campagne, Hautes eaux 2010

On rencontre de faibles valeurs entre 0 et 1.5mmhos/cm, au Sud Ouest d'El Harrach, autour de Sidi Moussa. Dans le secteur de Réghaia et dans la partie Nord de Rouïba, les valeurs oscillent entre 1.5 et 2 mmhos/cm dans les régions de Rovigo, Meftah, Khemis El Khechna, Rouïba et Réghaia. Les valeurs sont supérieures à 2 dans la région de Meftah, Maison blanche, Rouïba et Réghaia jusqu'à la bande côtière (Fort de l'Eau- Bordj-El Bahri).

En général toutes les valeurs sont modérées variant entre 0.5 et 1,2mmhos/cm. D'après la carte (figure IV-3), les valeurs de conductivité augmentent progressivement de l'amont vers l'aval. Les fortes valeurs peuvent être expliquées par :

- Le lessivage des terrains sédimentaires traversés par l'eau ;
- L'évaporation que subissent les eaux peu profondes de la nappe aquifères en bordure de la plaine, se traduit par une augmentation de la concentration en sels dissous dans le sens de l'écoulement, les eaux se chargent en sels tout au long de leur trajet ;
- des rejets d'eaux usées d'origine domestique et industrielle ;
- les engrais chimiques et pesticides utilisées en agriculture ;
- une augmentation très sensible des conductivités à mesure que l'on s'approche du littoral (Bordj El Kiffan-Stamboul) due au phénomène de l'intrusion marine.

b-2 campagne, Basses eaux 2010

On remarque dans les régions Baraki et Sidi Moussa la conductivité électrique entre 1.3 et 1.4 mmhos/cm (W042-997, W042-1010). et augmente à Meftah et Larbaa de valeur 1.8 et 2mmhos/cm (W042-1003, W042-439) dans la partie sud ouest.

Une augmentation plus forte à Oued El Hamiz jusqu'à Oued Réghaia (entre Rouïba et Bordj-El Bahri-W021-893, W021-417) a valeur entre 1.9 et 2 mmhos/cm et aux nord de Réghaia la conductivité électrique augmente à valeur égale à 2.9 (W021-894). (figure IV-4.)

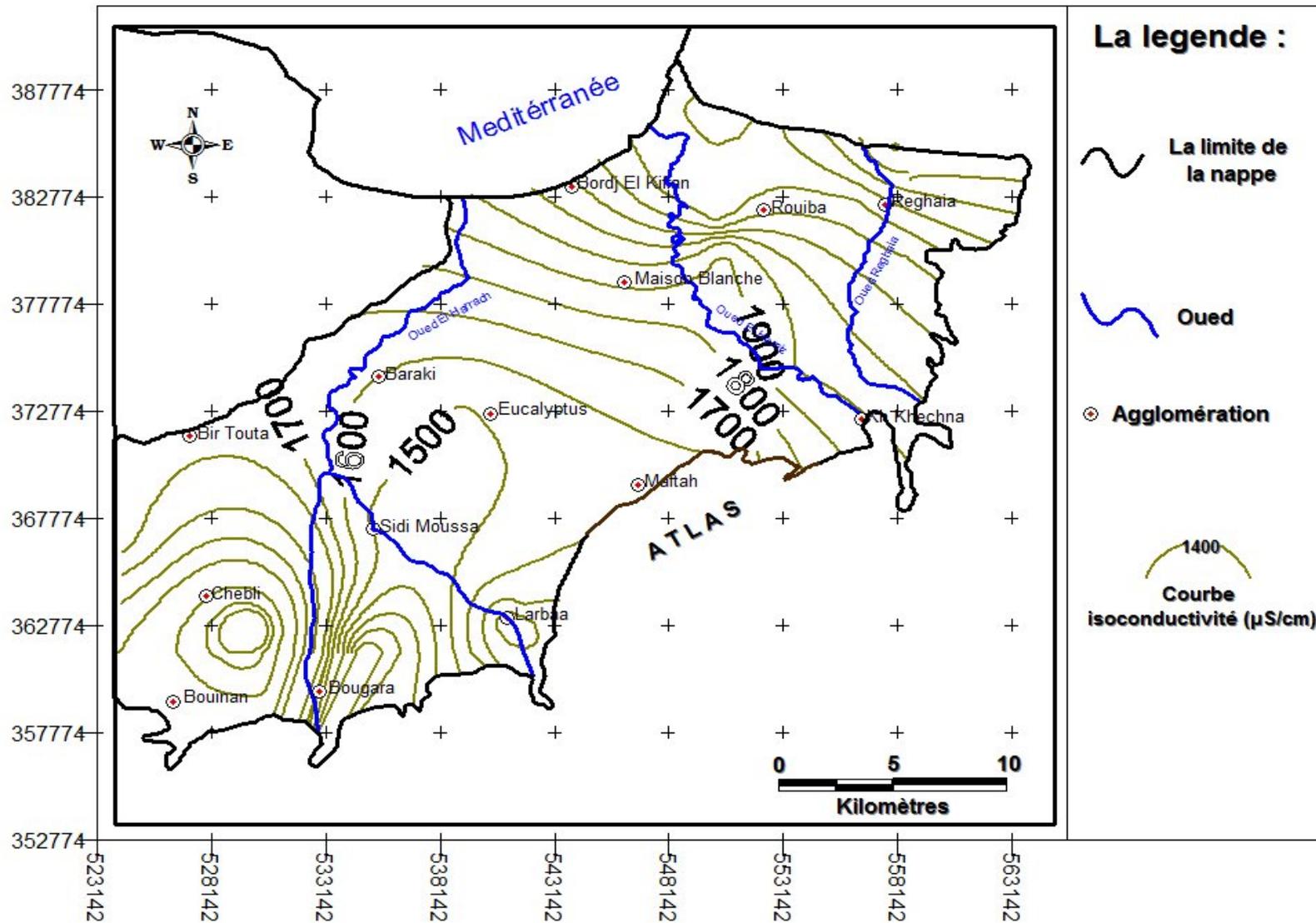


Figure IV-3 : Carte d'isoconductivité en $\mu\text{S}/\text{cm}$ (campagne, avril 2010)

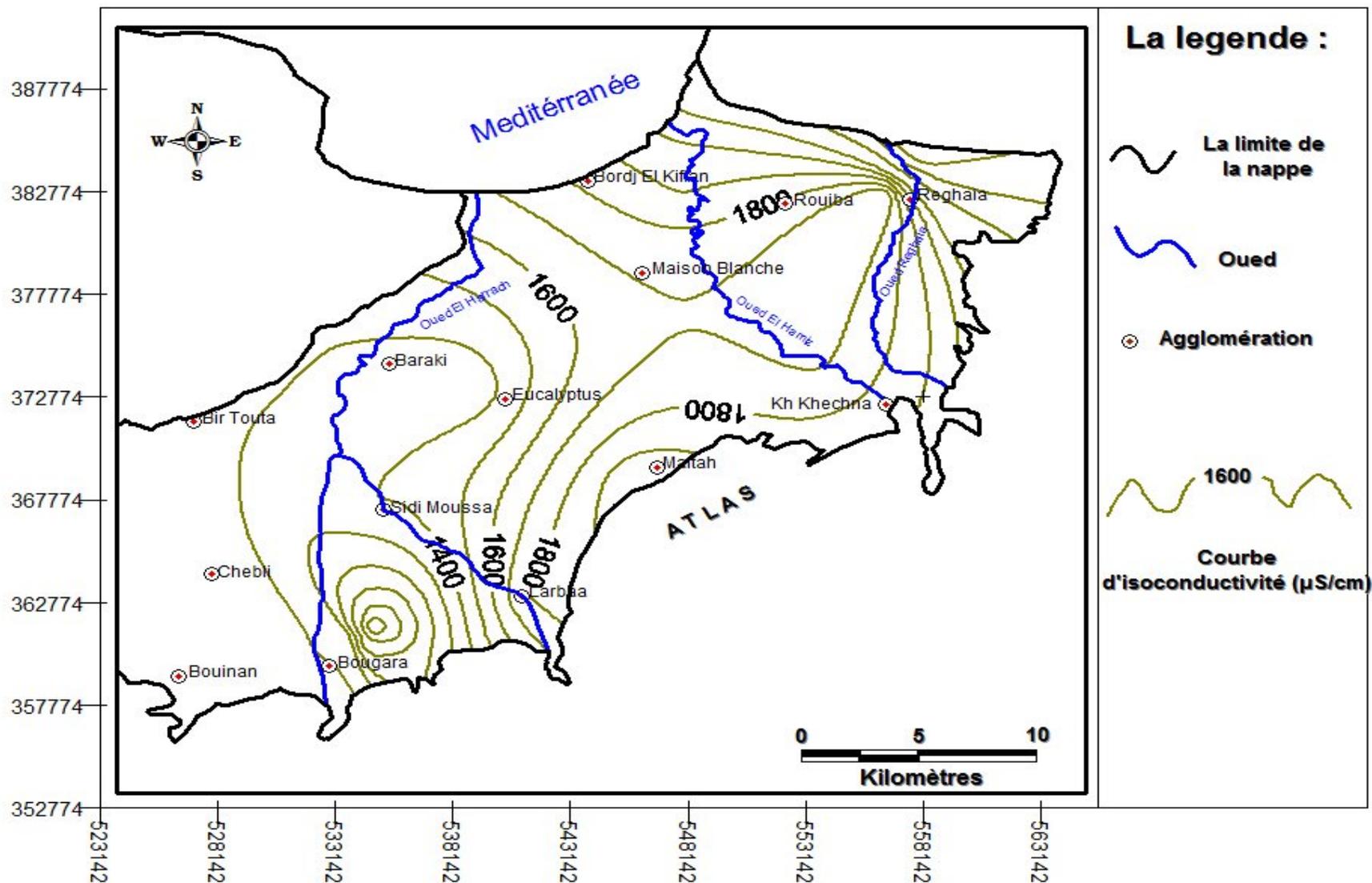


Figure IV-4 : Carte d'isoconductivité en $\mu\text{S}/\text{cm}$ (campagne, basses eaux 2010)

c-Le Résidu sec :

Le résidu sec représente la totalité des sels dissous et la matière organique et correspond à la minéralisation totale d'une eau.

Dans la nappe alluviale de la Mitidja orientale, le résidu sec varie de 840 à 1080mg/l dans la partie amont de l'oued El Harrach , Larbaa, Meftah et de 1080 à 1320 mg/l à l'aval de l'oued Réghaia et El Hamiz dans les régions de Rouiba, Réghaia, Maison blanche jusqu'à la bande cotière (Bordj El kifan, fort de l'eau) les fortes teneurs sont observées en aval de a nappe alluviale notamment au niveau des points W041-1763, W021-891, W021-894 qui présentent une forte minéralisation.

IV-1-2-2- Paramètres chimiques et Interprétation des cartes hydrochimiques :**a-Carte d'isoteneurs en Chlorure (figure IV-5) :**

Dans la région d'étude, les teneurs en chlorures obtenues sont inférieures à celles établies par l'OMS (200 mg/l) mais dans certains points(W041-1763, W021-891, W021-5, W021-192, W021-894, W021-893) elle est supérieure à celles établies par l'OMS.

Elles s'échelonnent entre 42 mg/l à 197mg/l au niveau de l'Atlas et augmentent progressivement vers l'aval jusqu'à atteindre des valeurs extrêmes supérieures à 200mg/l, au fur et à mesure qu'on avance vers la côte .

b-Carte d'isoteneurs en Nitrates (figure IV-6) :

La présence de nitrates dans l'eau peut avoir plusieurs origines :

- une origine liée aux activités humaines (rejets industriels, agricoles et urbains) ;
- une origine naturelle dans la mesure où les nitrates résultent des transformations de l'azote dans les eaux et les sols (cycle de l'azote).

La carte d'isoteneurs en NO_3^- montre des valeurs oscillant de 8 à 80mg/l. 43.75% des échantillons d'eaux prélevées ont une teneur supérieure à 50mg/l. On remarque un resserrement des courbes d'isovaleurs en nitrates au niveau de Réghaia, Rouiba et le long de la région cotière. Ces fortes teneurs sont dues principalement aux lessivages des engrais azotés et aux différents rejets industriels et domestiques. Elles se localisent dans la partie Sud-Ouest au niveau de Rovigo(W042-1000) , Larbaa(W042-1003, W042-385), et dans la partie Nord (maison blanche, Réghaia, Rouiba et la Baie d'Alger) .Les normes internationales recommandent des concentrations inférieures à 50mg/l pour une eau destinée

à l'alimentation en eau potable ;donc les eaux de la plaine de la Mitidja doivent être surveillées.

c-Carte d'isoteneurs en Calcium (figure IV-7) :

L'observation de la carte d'isoteneurs en Ca^{++} , fait ressortir des concentrations plus ou moins fortes, de l'ordre de 118 à 221 mg/l. Les fortes concentrations se localisent au nord (W021-5). Au Nord , elles sont comprises entre 203 et 221mg/l(W021-894) dans les régions cotières(Bordj El Kifan, Ben Zerga...). Les fortes teneurs en calcium proviennent probablement du lessivage des dépôts des formations carbonatées du piémont de l'Atlas au sud. On note les anomalies suivantes :

- Une, suivant l'axe de l'oued Harrach et superposée aux dépôts calcaires où les concentrations augmentent parallèlement au sens de l'écoulement de 140 à 260 mg /l.
- Une autre, se localise aux pieds des reliefs de l'Atlas Blidéen, marnes carténiennes du Miocène .

d-Carte d'isoteneurs en Magnésium (figure IV-8) :

La carte d'isoteneurs en Magnésium montre que la majorité des concentrations sont inférieures à 50mg/l (68.75% de ces échantillons). Les fortes teneurs en Magnésium s'accroissent en allant vers les régions cotières .La valeur maximale est enregistrée au niveau de W021-891 ou elle atteint 81mg/l.On observe un resserment très marqué des courbes d'isoteneurs le long de la cote Est, ceci est du probablement à l'intrusion marine.Le magnésium provient essentiellement du lessivage des formations argileuses(Djoudar/Hallal,1993).

e-Carte d'isoteneurs en Sodium (figure IV-9) :

Dans la région d'étude, les teneurs en sodium obtenues s'échelonnent entre 36 mg/l à 199mg/l au niveau de l'Atlas et augmentent progressivement vers l'aval jusqu'à atteindre 333 mg/l au niveau du (W041-1763) dans la région de Réghaia et Rouiba.

Les cartes d'isoteneurs en chlorures montrent que les teneurs les plus importantes sont enregistrées dans la région de Réghaia, Rouiba et dans la bande cotière.L'évolution de ces concentrations notamment en aval est dû à l'intrusion marine et à la dissolution des formation géologique au contact de l'eau qui y séjourne .A cet effet, les courbes d'isoteneurs en chlorures sont parallèles à celles du sodium et de la conductivité électrique comme le montre la figure IV-3.

f-Carte d'isoteneurs en Sulfates (figure IV-9) :

Les teneurs en SO_4^{-2} , sont généralement entre 112 et 356 mg/l. Dans la partie amont, les teneurs sont comprises entre 153 mg/l et 257 mg/l dans la région de Meftah, Larbaa, Rovigo et Khemis El Khechna aux points d'eau (W042-1003, W042-1000), généralement elles sont stables dans cette zone.

Dans la partie centrale, on constate une légère augmentation de concentration suivant le sens de l'écoulement depuis les bordures vers les axes principaux des oueds où elles atteignent 356 mg/l au niveau de l'embouchure de l'Oued Réghaia et de l'Oued El Hamiz.

Les sulfates proviennent généralement de la dissolution du gypse ou de l'anhydrite, et nous supposons que ces concentrations en SiO_4 proviennent du lessivage des engrais des terrains agricoles et du rejet des eaux usées d'origine industrielle.

g-Carte d'isoteneurs en Bicarbonates (figure IV-10) :

Dans le secteur d'étude, 87.50% des teneurs en bicarbonates obtenus sont supérieures à celles exigées par l'OMS (400 mg/l). Elles s'échelonnent entre 411 mg/l (W042-1010) et 669 mg/l (W021-893), les valeurs décroissent de l'amont vers l'aval. La majorité des points d'eau analysés présentent des teneurs inférieures à 400 mg/l, et cela dans la partie centrale et au sud-ouest le long de l'Atlas Blidéen.

La carte d'isoteneurs en bicarbonates montre que les teneurs les plus importantes sont enregistrées dans les régions de Réghaia, Rouiba, Maison blanche et le long de la bande cotière (Bordj El Kifan, Ford de l'eau).

Notons que les fortes concentrations des bicarbonates dans l'eau sont fonction des paramètres suivants : Tension du CO_2 dissous, température de l'eau et la nature lithologique des terrains traversés, elles proviennent du lessivage des formations hydrogéologiques de l'Atlas Blidéen.

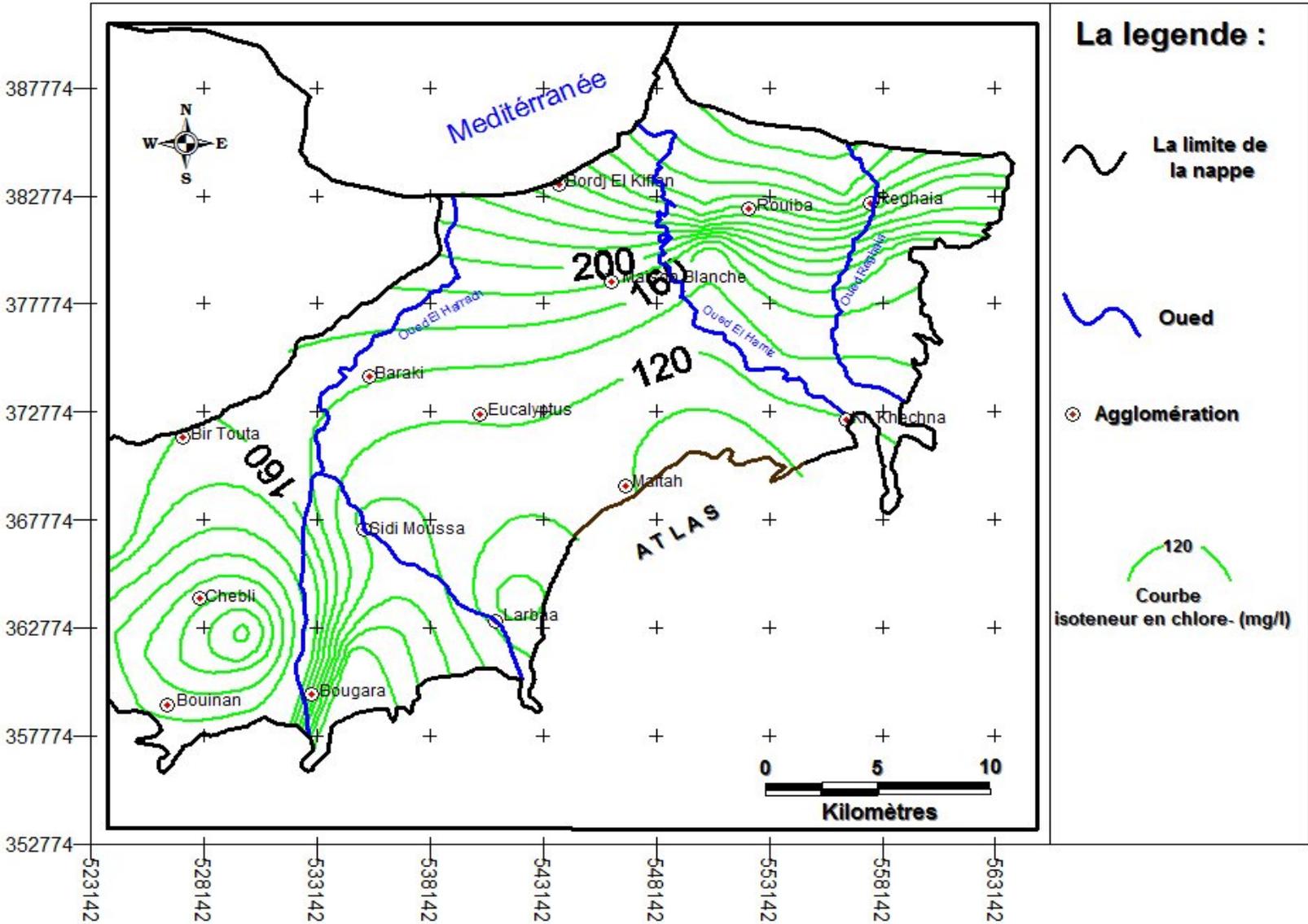
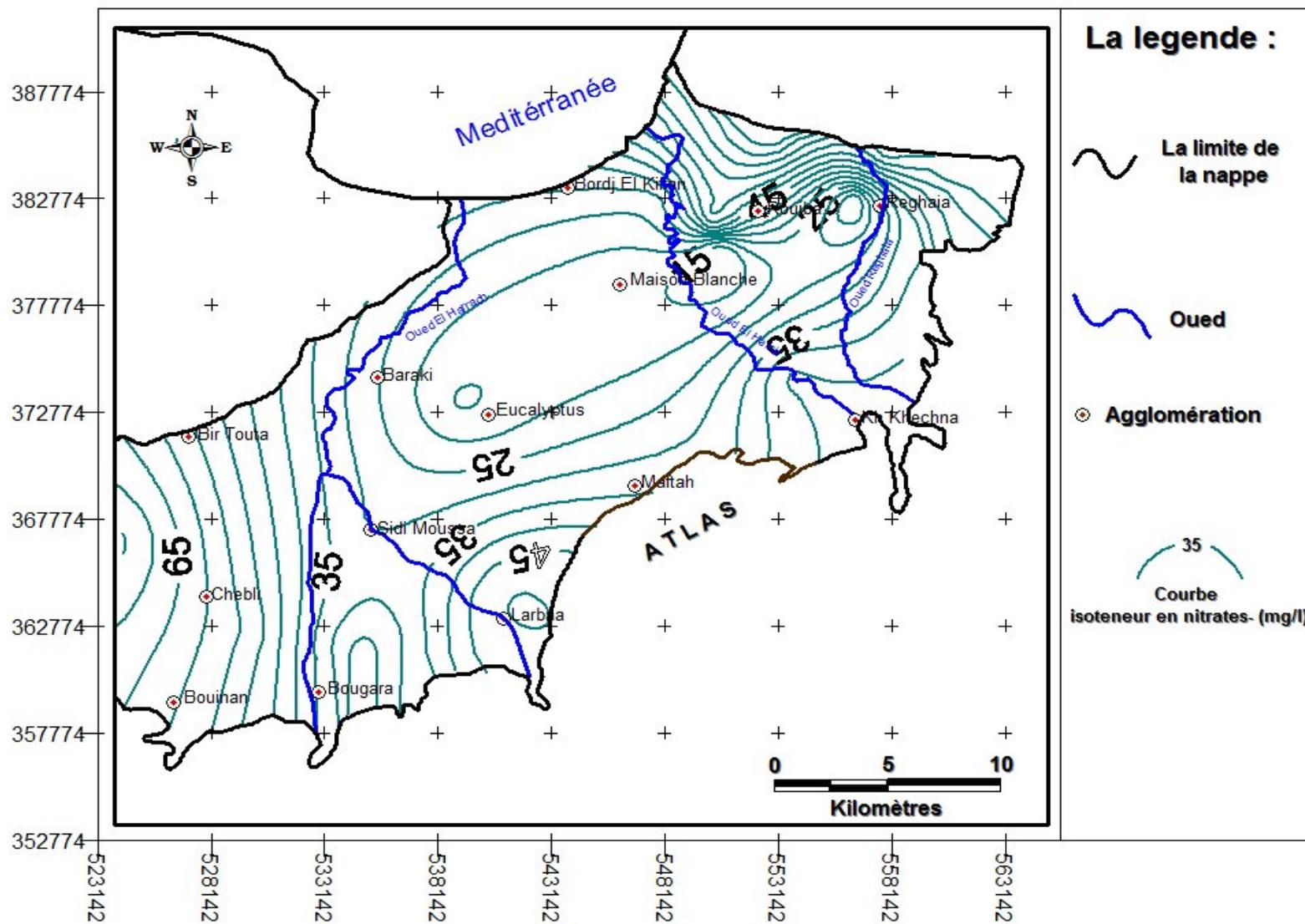


Figure IV-5 : Carte d'isoteneur du chlore en mg/l(campagne, avril 2010)



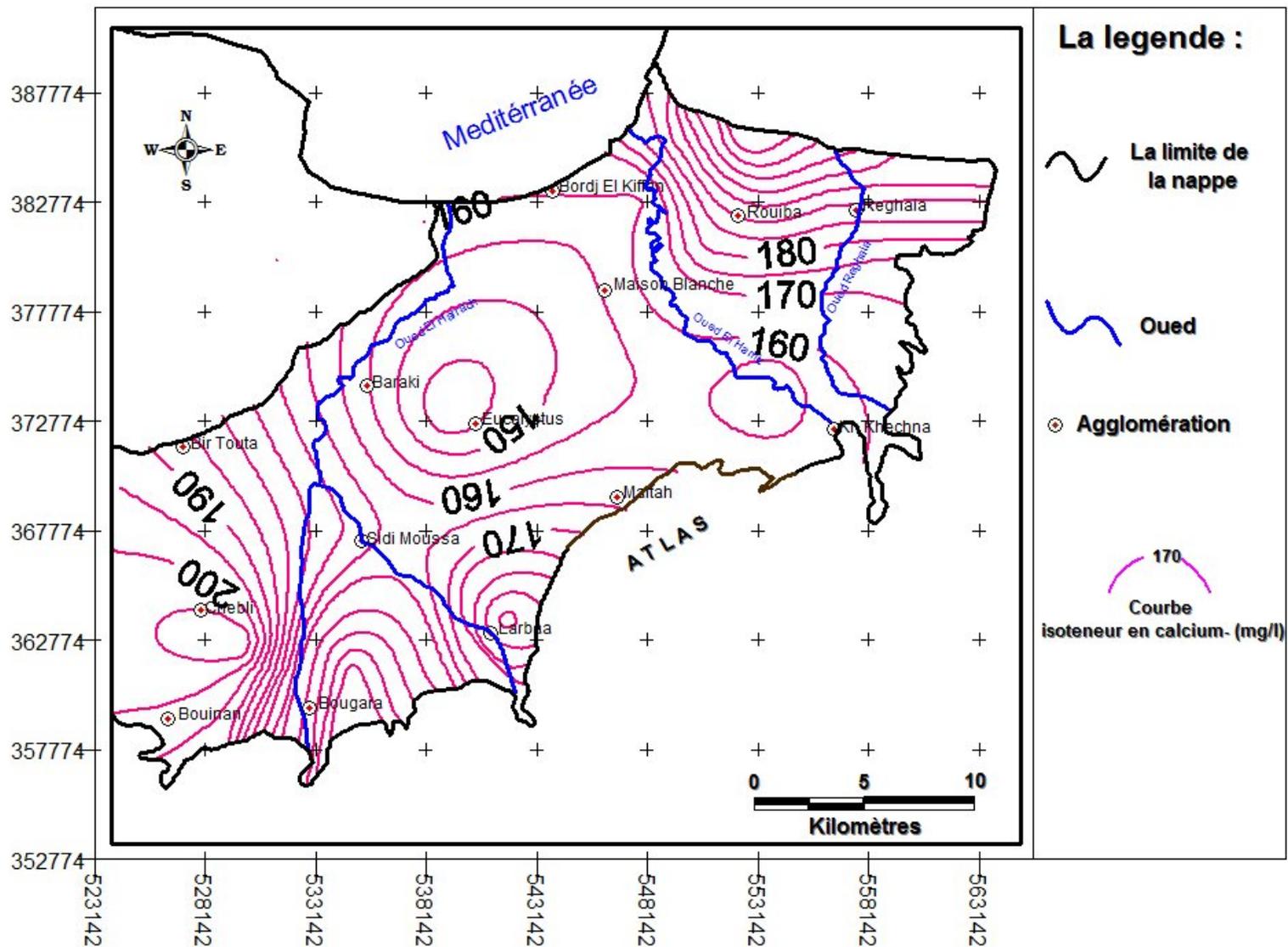


Figure IV-7 : Carte d'isoteneur en Calcium en mg/l(campagne, avril 2010)

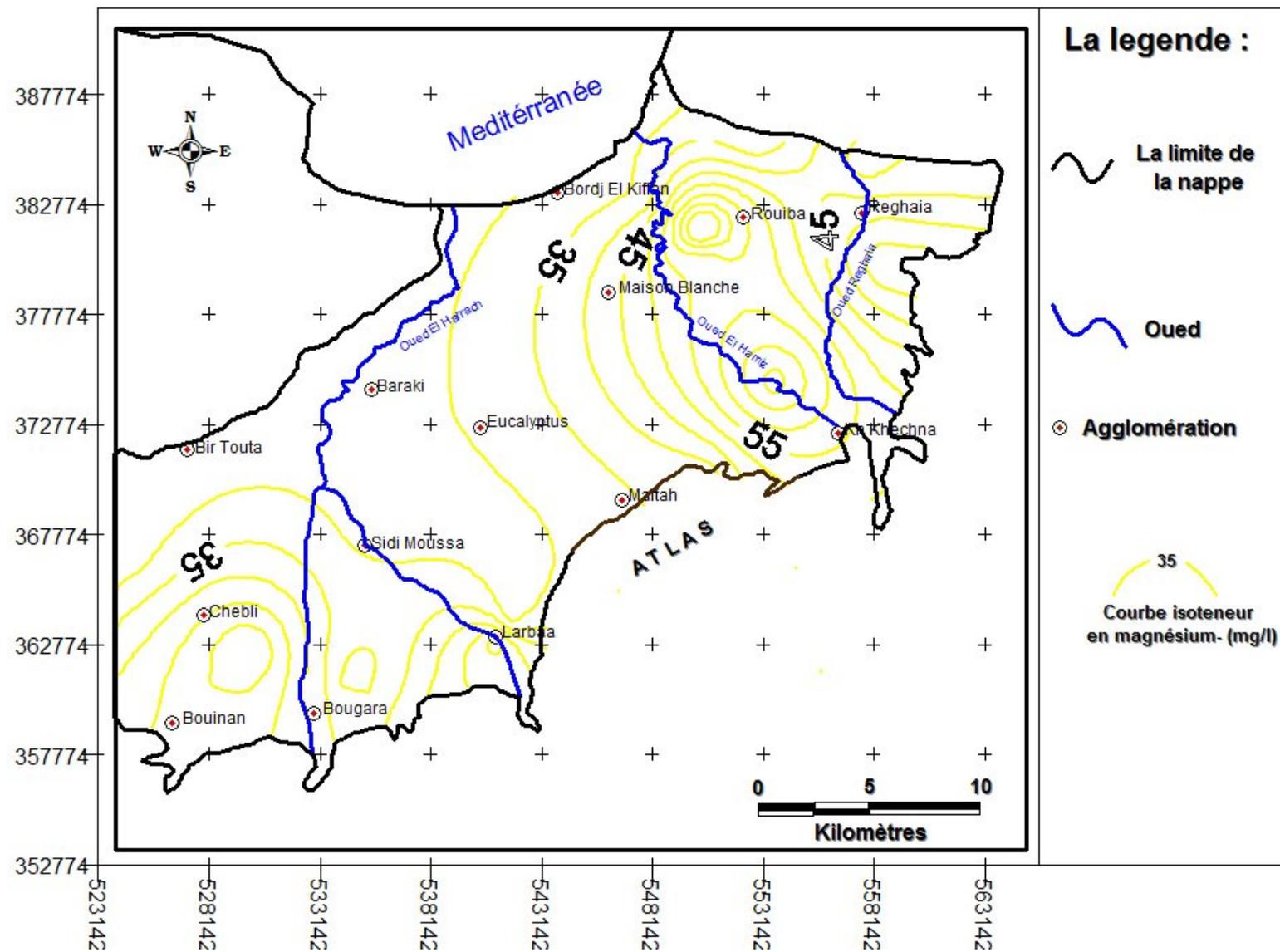


Figure IV-8 : Carte d'isoteneur en Magnésium en mg/l(campagne, avril 2010)

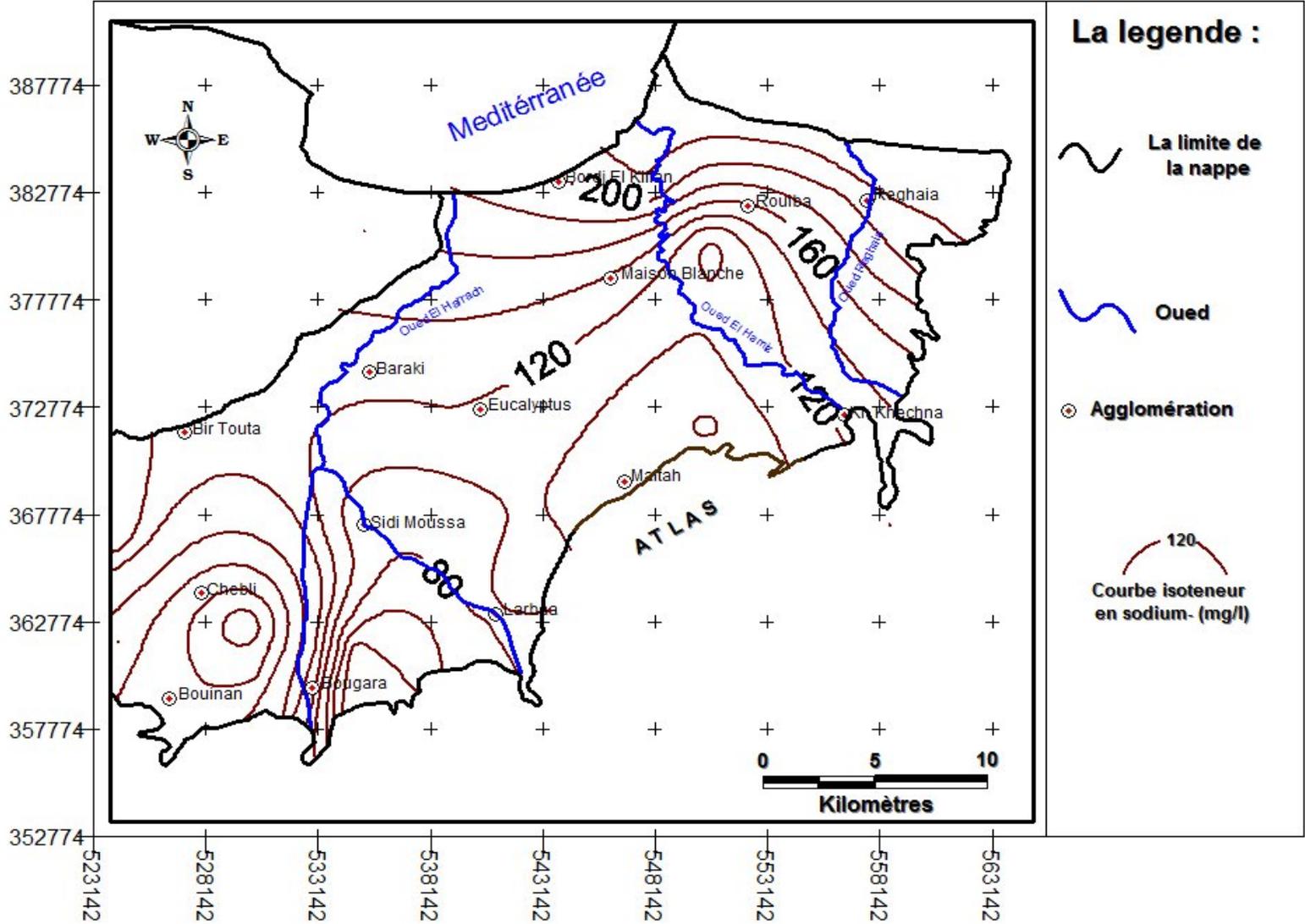


Figure IV-9 : Carte d'isoteneur en Sodium en mg/l(campagne, avril 2010)

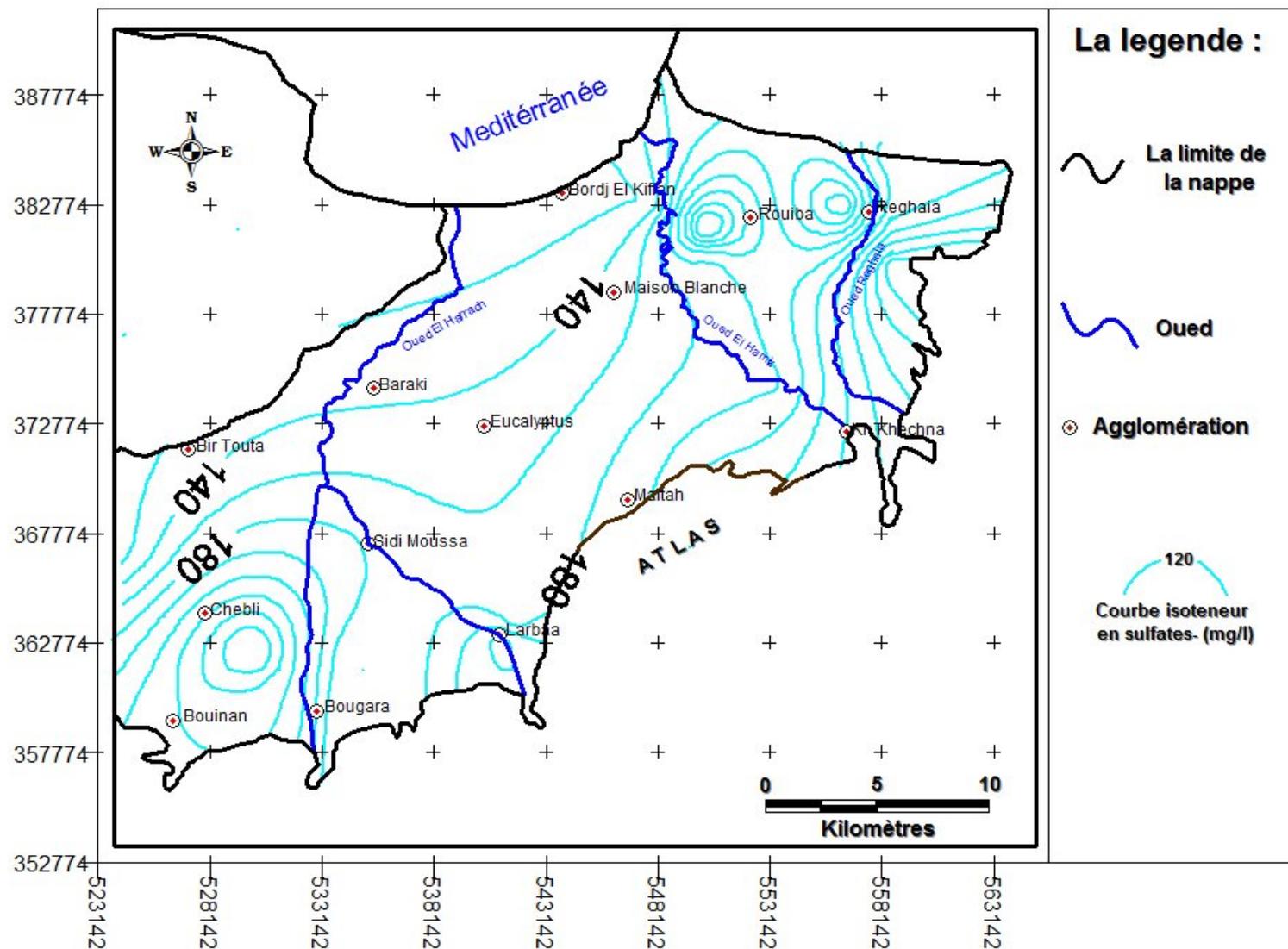


Figure IV-10 : Carte d'isoteneur en Sulfates en mg/l(campagne, avril 2010)

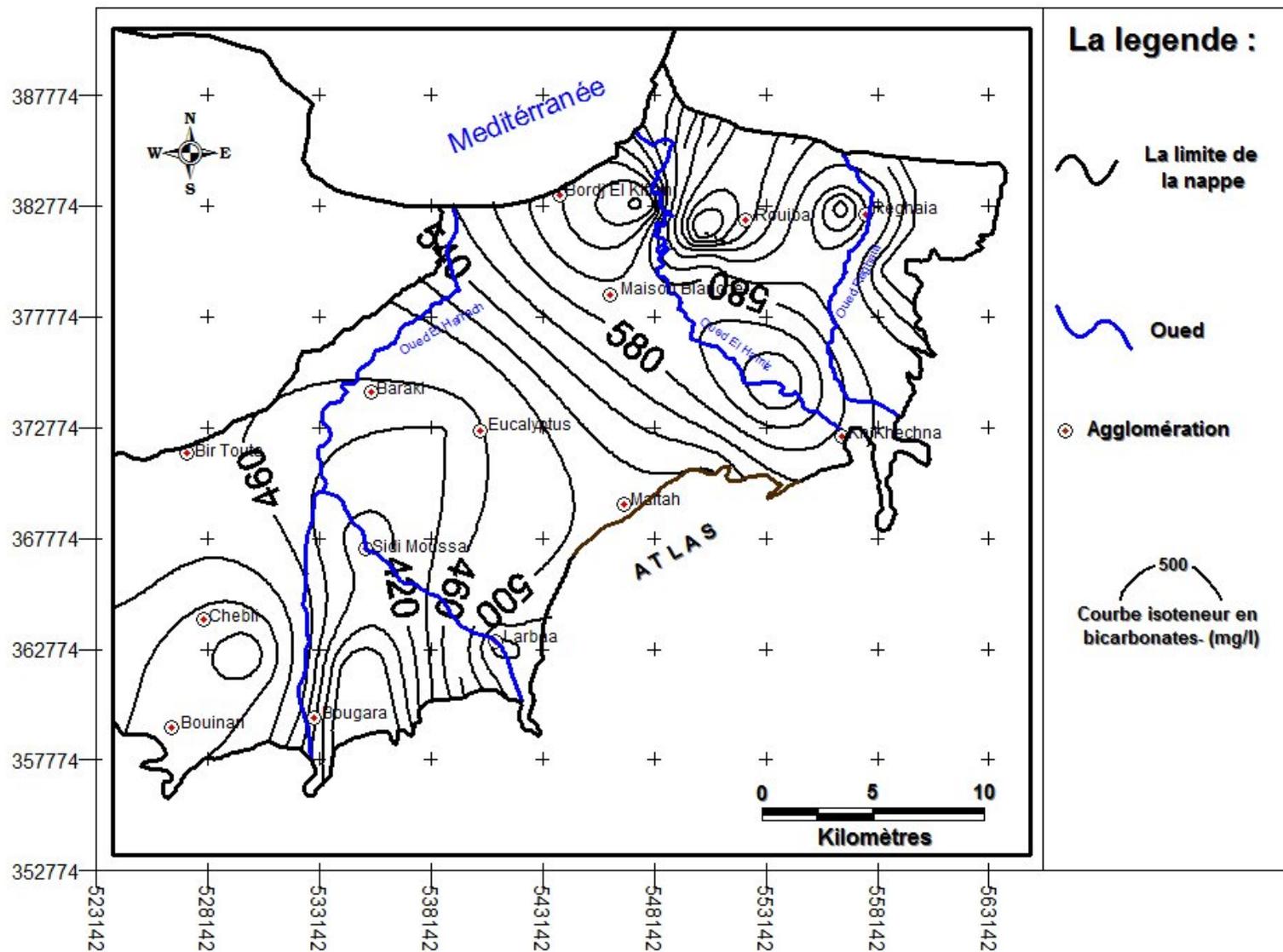


Figure IV-11 : Carte d'isoteneur en Bicarbonates en mg/l(campagne, avril 2010)

IV-2- Classification des eaux de la nappe de la Mitidja Orientale :

Il est primordial de réaliser une analyse globale des eaux en tenant compte de l'association des ions entre eux et de l'évolution de leurs rapports.

IV-2-1- Classification des eaux d'après le diagramme de Piper :

Il existe une classification chimique qui est donnée par le diagramme de piper, il permet de représenter le faciès chimique d'un ensemble d'échantillons d'eaux.

Il est composé de deux triangles permettant de représenter le faciès anionique et le faciès cationique et d'un losange synthétisant le faciès global.

Ce type de diagramme est particulièrement adapté pour étudier l'évolution du faciès des eaux lorsque la minéralité augmente ou bien pour distinguer des groupes d'échantillons. Dans cette représentation, l'utilisation est voisine de celle d'un plan factoriel de l'analyse en composantes principales.

Cette représentation chimique nous permet d'évaluer globalement la composition en éléments majeurs des eaux souterraines.

L'insertion des résultats de l'analyse chimique des eaux souterraines de la nappe alluviale de la Mitidja Est sur ce diagramme montre une tendance vers le pôle chloruré et bicarbonaté pour les anions; tandis que les cations donnent une affinité vers les pôles calcique et sodique.

Au niveau du diagramme on distingue deux familles: (Figure VI-12)

Eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes 66.67 %

Eaux bicarbonatées calciques 33.33 %

Diagramme de Piper

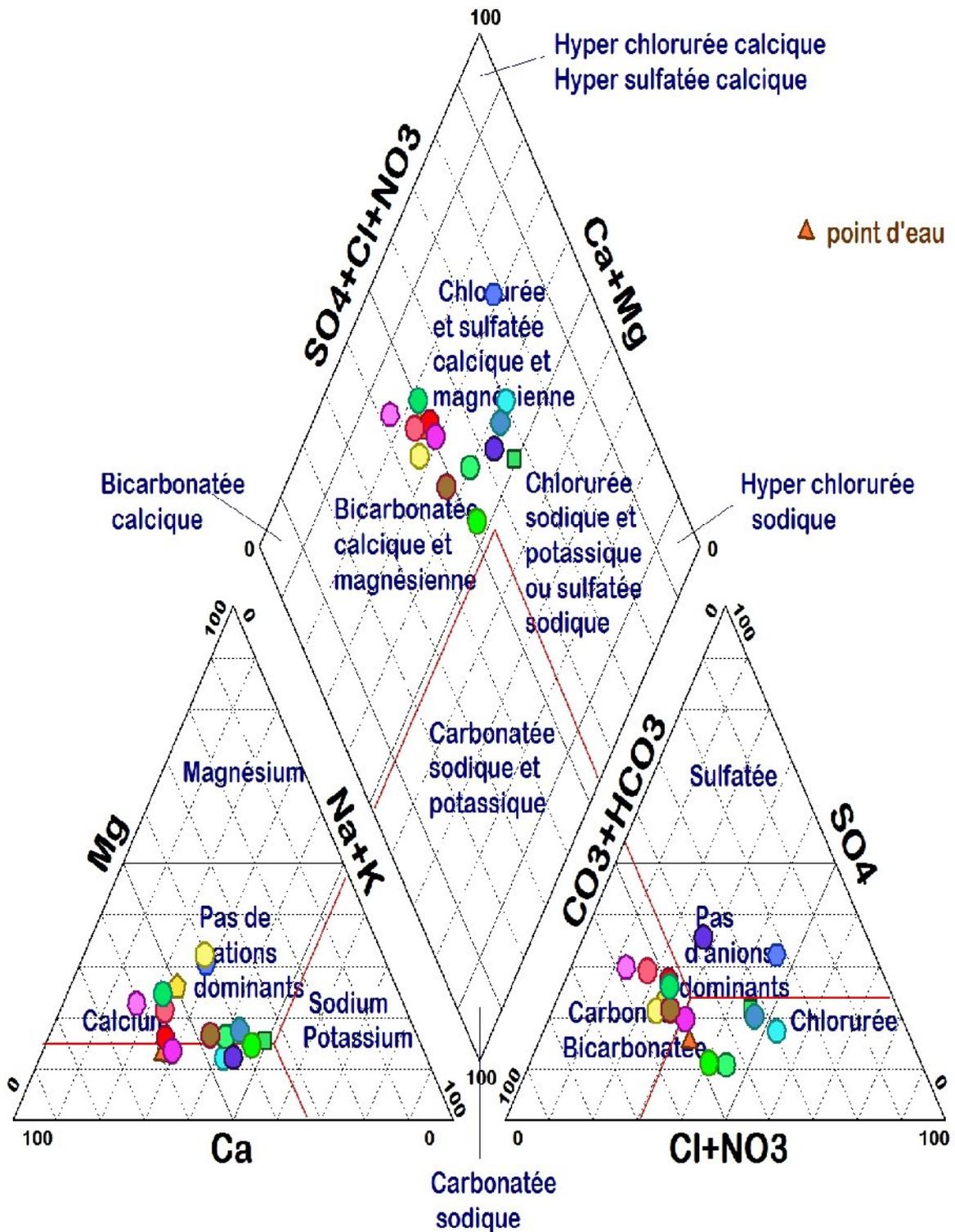


Figure IV-12 :diagramme de piper pour les eaux de la nappe alluviale de la Mitidja Est(campagne, avril 2010)

VI-2-2 : Aptitudes des eaux à l'irrigation :

La qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation est essentielle pour le rendement et la quantité des récoltes, pour l'entretien de la productivité des sols et pour la protection de l'environnement.

Les propriétés physiques et mécaniques du sol, en particulier sa structure (stabilité des agrégats) et sa perméabilité, sont très sensibles aux types d'ions échangeables présents dans les eaux d'irrigation. En effet la qualité de l'eau d'irrigation peut être mieux déterminée par une analyse chimique faite au laboratoire. Le facteur le plus important pour déterminer la convenance d'une eau pour l'irrigation est sa salinité.

Toutes les eaux provenant des sources, des rivières ou pompées à partir de puits contenant d'appréciables quantités de substances chimiques provenant de la dissolution des formations géologiques en place.

Dans les zones à activité agricole intense, la fertilisation est la cause majeure de salinisation des aquifères.

La composition des sels dans l'eau varie selon la source et les propriétés des composés chimiques constituants.

Les principaux ions de l'eau d'irrigation et leurs caractéristiques sont présentés dans le Tableau IV-1 :

Tableau IV-1 Principaux ions présents dans l'eau d'irrigation : (A. Phocaides)

Ions	Symbole chimique	Poids équivalent
Anions (ions acides)		
Chlorure	Cl ⁻	35,5
Sulfate	SO ₄ ²⁻	48
Carbonate	CO ₃ ²⁻	30
Bicarbonate	HCO ₃ ⁻	61
Nitrate	NO ₃ ⁻	62
Cations (ions basiques)		
Sodium	Na ⁺	23
Potassium	K ⁺	39,1
Calcium	Ca ⁺⁺	20
Magnésium	Mg ⁺⁺	12,2

Tous les ions sont exprimés en milligrammes par litre (mg/l) et milliéquivalents par litre (meq/l). Cette dernière unité est préférable car les critères de qualité de l'eau impliquent des calculs en milliéquivalents par litre (meq/l).

La formule de conversion est:

$$meq/litre = \frac{mg/litre}{poids\acute{e}quivalent}$$

IV-2-2-1 : La classification de la FAO

La FAO propose cinq classes qui seront résumées sous forme de Tableau IV-2

Tableau IV-2 : classification mondiale de la FAO des eaux d'irrigation par rapport à la conductivité électrique :

Classe	CE (g/l)	appréciation
1	0-1	Bonne pour l'irrigation
2	1-3	Faiblement salée
3	3-5	Salinité moyenne
4	5-10	Fortement salée
5	>10	Salinité extrême

IV-2-2-2 : La classification américaine (USDA)

Elle se base sur la conductivité électrique et le SAR

A- Classification par rapport à la CE : les Américains proposent quatre classes de salinité regroupées dans le tableau suivant.

Tableau IV-3: classification américaine (USDA) des eaux d'irrigation par rapport à la conductivité électrique.

Classe	CE (μ mho/cm)	Degré
C1	<250	Propre pour l'irrigation
C2	250 à 750	Propre + lessivage
C3	750 à 2250	Peut être utilisée avec drainage
C4	>2250	Impropre pour l'irrigation

B- La classification par rapport au SAR :

La qualité d'une eau destinée pour l'agriculture, est en étroite relation avec son degré d'alcalinité. En effet, la dispersion de la phase colloïdale du sol, la stabilité des agrégats, la structure du sol et la perméabilité à l'eau sont toutes très sensibles aux types d'ions échangeables que contient l'eau d'irrigation.

L'augmentation de l'alcalinité du sol, qui peut se produire avec une eau concentrée en sodium, réduit la perméabilité particulièrement en surface. Ce phénomène est dû à la dispersion et au gonflement des argiles lorsque la quantité en Na échangeable augmente. Toute fois, pour une

certaine valeur du rapport d'adsorption du sodium (SAR), la vitesse d'infiltration augmente ou diminue en fonction du niveau de salinité.

Par conséquent, le SAR et la CE doivent être employés en association pour évaluer les problèmes potentiels éventuels.

Le problème du sodium est diminué si la quantité de calcium plus magnésium est élevée par rapport à la quantité de sodium. Cette relation est nommée taux d'adsorption du sodium (SAR), une valeur calculée par la formule:

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{[\text{Mg}^{++}] + [\text{Ca}^{++}]}{2}}}$$

C'est le rapport du Sodium par rapport aux autres cations.

Ce terme est très utilisé et exprime le niveau d'alcalinité de l'eau selon les conditions suivantes :

- Si le SAR < 6

L'eau n'est pas alcaline

- Si 6 < SAR < 9

L'eau est alcaline et peut avoir un effet important sur la structure du sol (réduction importante de l'infiltration), et ce phénomène est d'autant plus important si le sol est argileux.

- Les risques liés au sodium

Le taux d'adsorption du sodium est couramment utilisé comme indice des risques liés au sodium dans les eaux et les sols, et comme un substitut du sodium échangeable du sol. Le taux d'adsorption du sodium (SAR) d'une eau donnée définit, dans une certaine mesure, la quantité relative de sodium susceptible d'être adsorbée par le sol.

L'effet des ions de sodium dans l'eau d'irrigation sur la réduction du taux d'infiltration et de la perméabilité du sol est fonction de la concentration totale en sels, comme le montre le Tableau IV-4

Tableau IV-4: problème potentiel d'infiltration du au sodium dans l'eau d'irrigation :

Niveaux de salinité de l'eau d'irrigation (dS/m)	Réductions			
	Aucune	Légère	Moyenne	Sévère
ECw = 0,7	SAR < 1	SAR 1-5	SAR 5-11	SAR > 11
ECw = 0,7-3,0	< 10	10-15	15-23	> 23
ECw = 3,0-6,0	< 25	> 25	Pas d'effet	Pas d'effet
ECw = 6,0-14,0	< 35	> 35	Pas d'effet	Pas d'effet
ECw > 14	Pas d'effet	Pas d'effet	Pas d'effet	Pas d'effet

Source: extrait de Rhoades, Oster et Schroer.

C- L'utilisation du SAR et la CE pour évaluer les problèmes d'infiltration :

À un SAR donné, le taux d'infiltration augmente en fonction de certaines conditions (la salinité par exemple). Donc le SAR et la CE devraient être utilisés en combinaison pour évaluer les problèmes potentiels.

Tableau IV-5 : la valeur Moyenne du SAR, CE et PH

	Haute eaux 2010
SAR	14,08
CE mmhos/cm	2,067
PH	7,7

Généralement, le CE varie de 1,00 à 3,30 (annexe), la valeur moyenne est de 2,067 mmhos/cm, Le SAR varie de 4,23 à 28,93 (annexe), la valeur moyenne est de 14,08.

Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus, et d'après le diagramme pour la classification de l'eau d'irrigation (Hand book 60) ;(Annexe) nous avons constaté que notre eau est classée C3-S3.

Cette classe présente une salinité élevée et une alcalinité élevée, cette eau est utiliser avec précautions qu'aux sols légers et bien drainés et des plantes tolérantes à la salinité, le lessivage est important.

IV-3-3 : Cartographie de la qualité des eaux

La cartographie constitue le moyen le plus adapté pour une bonne représentation spatiale. L'outil SIG s'avère être très approprié pour cartographier un phénomène naturel pour mettre en évidence la variation spatiale unidimensionnelle.

- **Etablissement des cartes**

Une fois la structure spatiale de la variable étudiée par la méthode de triangulation est réalisée. Les cartes de CE et du SAR sont représentées dans les figures (figure IV-3 et figure IV-13).

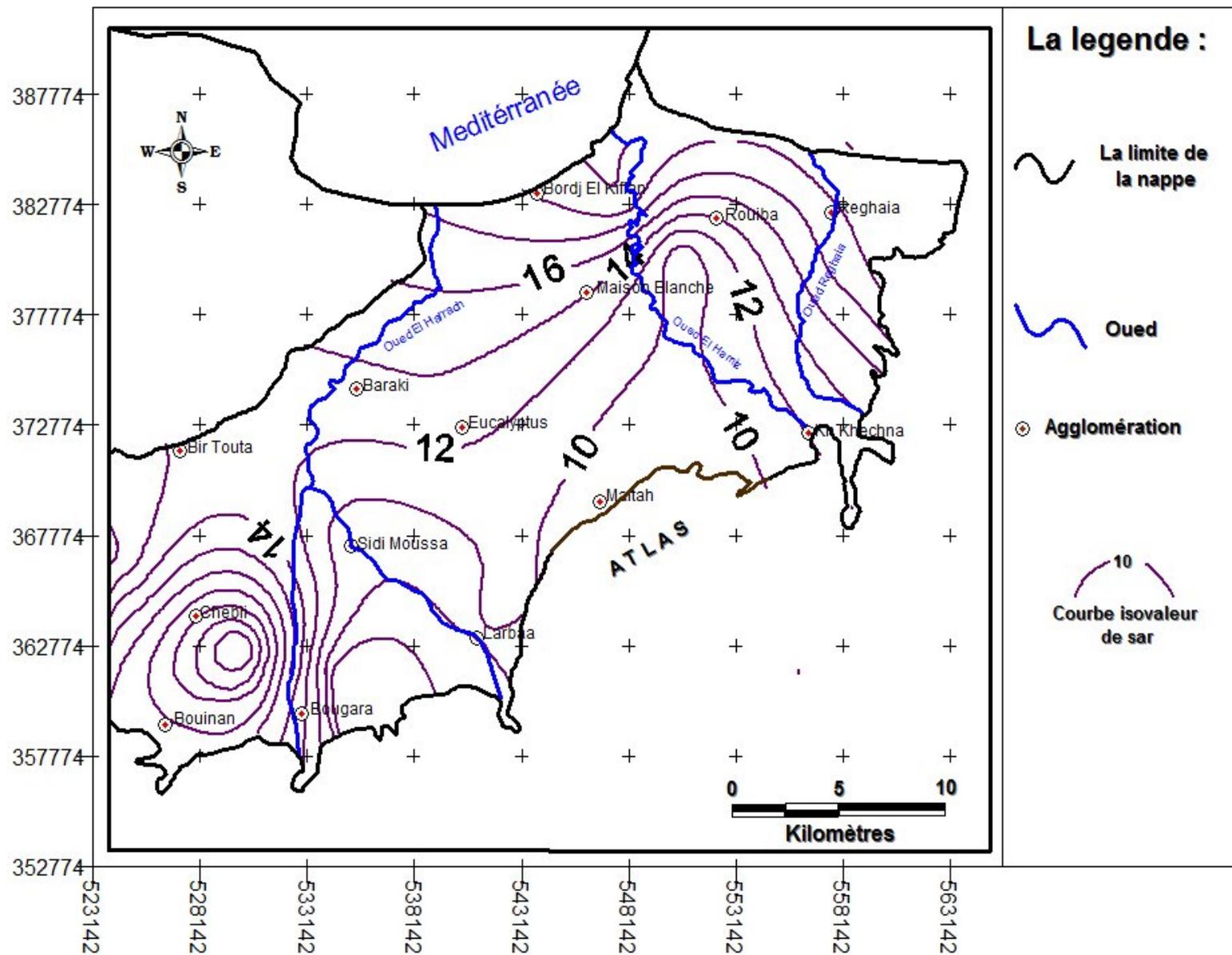


Figure IV-13 : Carte de l'évolution du SAR (campagne, avril 2010).

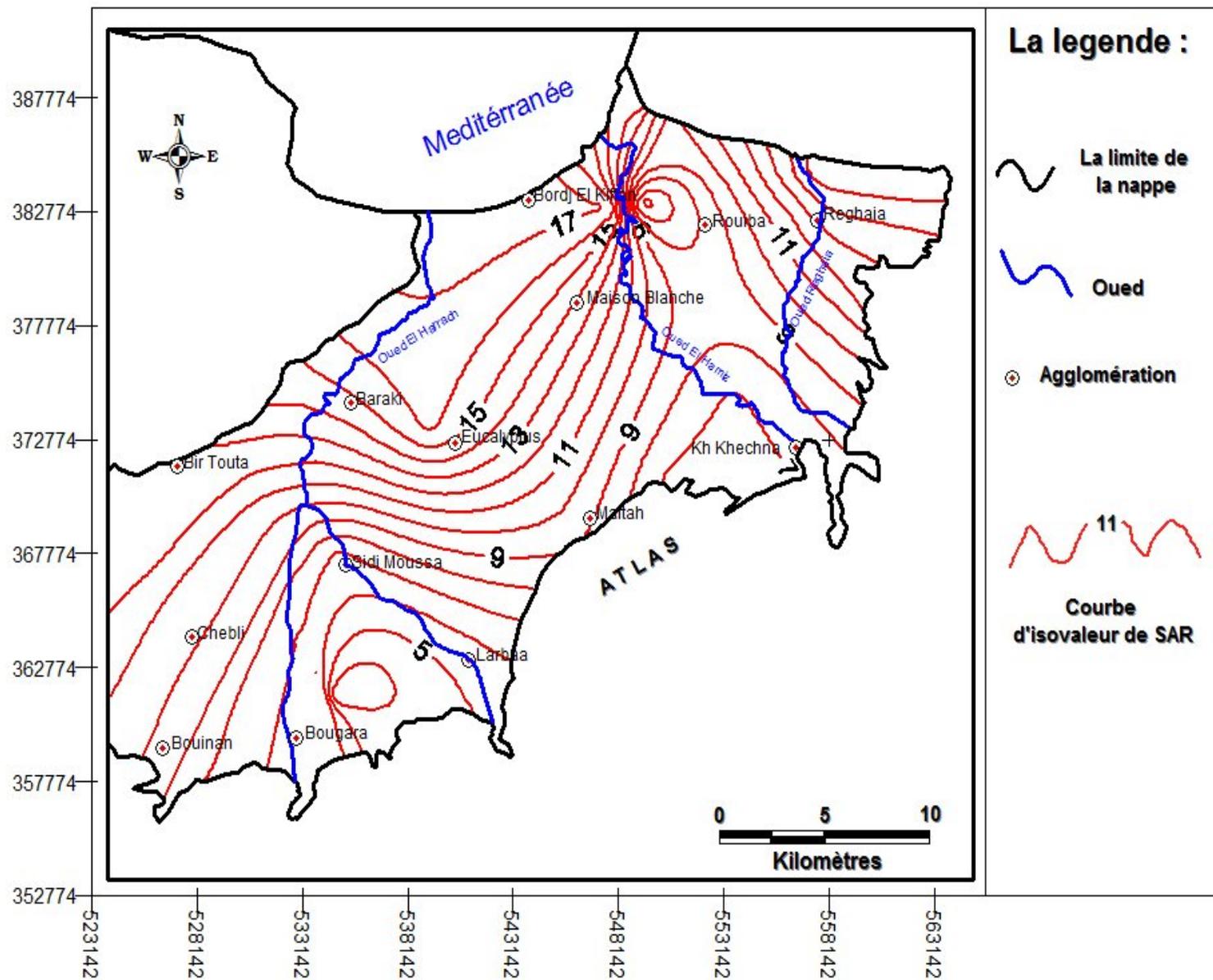


Figure IV-14 : Carte de l'évolution du SAR (campagne Basses eaux 2010).

D'après la carte de la conductivité électrique des eaux de la nappe alluviale de la Mitidja Est (Figure IV-3), les valeurs de cette dernière augmentent à l'extrême Est, au nord de la ville de Rouiba, ce qui confirme l'avancée du biseau salé vers le continent, constatée dans la carte de Na^+ et Cl^- .

Les cartes du SAR Figure IV-13, montrent que les fortes valeurs se trouvent dans l'extrême Est et une légère augmentation des valeurs vers l'ouest de la plaine.

Conclusion :

De cette étude hydrochimique nous retiendrons que les eaux de la nappe alluviale de la Mitidja orientale présentent un pH des eaux souterraines variant entre 7,2 et 8,2, ce qui correspond aux normes de potabilité. La conductivité dépasse les normes admissibles (1,5 mmhos/cm) notamment à l'aval jusqu'à atteindre des valeurs supérieures à 2 au niveau des régions côtières ce qui atteste .

Un résidu sec atteignant 1500 mg/l dans la région de Rouiba et au niveau de la Baie d'Alger.

Les valeurs de sodium et du chlore sont plus concentrées au Nord de la plaine et présentent des courbes d'isovaleurs parallèles entre elles, qui est due principalement à la même source de contamination qui est l'avancement du biseau salé.

I- CONCEPTS DE VULNERABILITE

La notion de vulnérabilité, liée au risque de pollution des eaux souterraines, englobe à la fois celle d'agression et de défense (Suais *et al*, 1983 ; BreLOT *et al*, 1996 ; in Touileb, 1997).

La vulnérabilité liée au risque de pollution est déterminée par la facilité de pénétration des substances polluantes s'infiltrant à partir de la surface du sol vers la nappe (Robins *et al*, 1989 ; in Touileb 1997).

La vulnérabilité des nappes correspond à leur sensibilité aux différents facteurs physiques stables dans la mesure où elles sont plus ou moins exposées à la pollution à partir de la surface du sol. Elle étudie les possibilités de propagation du polluant dans le sol (Albinet, 1989).

Les divers facteurs affectant la propagation du polluant peuvent être classés en quatre catégories :

- Etat et caractéristiques physiques et chimiques du sol et du sous-sol. Le facteur principal est la lithologie ;
- Profondeur de la surface piézométrique, laquelle impose le temps de séjour en zone non saturée ;
- Paramètres de l'écoulement de l'eau souterraine : coefficient de perméabilité ou transmissivité, direction et vitesse de déplacement ;
- Conditions d'alimentation et d'écoulement, facteurs de renouvellement de la réserve totale moyenne (Castany, 1982).

Pour une étude rigoureuse, le concept de vulnérabilité est limité voir relatif car non qualifiable en raison de :

- La multiplicité et de l'incertitude des facteurs à prendre en compte qui demeurent souvent subjectifs et indépendants ;
- La nécessité de tenir compte du passé, du présent et du futur.

Il a été suggéré que la représentation cartographique de la vulnérabilité est plus intéressante, surtout pour un grand territoire, la présélection des sites par des classes de vulnérabilité (Tableau 2) représente un outil de décision très puissant pour un aménagement éventuel (Robins *et al*, 1989 ; in Touileb 1997).

II-Méthodes d'évaluations de la vulnérabilité :

La vulnérabilité des nappes d'eau souterraines est une donnée locale qui peut servir à la protection de la ressource en eau, à la planification rationnelle de l'utilisation du Territoire et à la prévention de l'environnement. L'accroissement de la population et le développement économique entraîne une augmentation des volumes d'eau consommés et plus encore une détérioration de sa qualité. Les eaux souterraines, de même que pour les eaux de surface, sont susceptibles d'être contaminées par les activités humaines.

Les phénomènes de filtration et les réactions qui se produisent dans les sols, offrent cependant un certain niveau de protections des nappes contre les polluants déversés à la surface du sol. Cette protection varie en fonction de la nature des matériaux constituant le sol et des conditions hydrogéologiques locales. Dans ce sens, de nombreux pays européens et américains ont conçu une ou plusieurs méthodologies d'évaluation et de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution.

Plusieurs méthodes ont été développées : française, anglaise, allemande et américaine.

II-1 : Définition de la vulnérabilité :

La vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine est une notion complexe par le nombre de facteurs qu'elle fait intervenir et par l'importance variable qui peut être attribuée à chacun. Dans la littérature, nous pouvons rencontrer plusieurs définitions de la vulnérabilité des nappes à la pollution bien que convergeant vers le même sens.

* En 1968, J. MARGAT indiquait qu'on pouvait la définir « comme le fait pour une nappe souterraine d'être plus ou moins exposée par les conditions naturelles à un risque donné d'être polluée ».

* En 1970, M. ALBINET, reprend cette définition sous la forme suivante « la vulnérabilité des nappes correspond aux possibilités de pénétration et de propagation des polluants dans les terrains rencontrés en surface et pour les réservoirs dans lesquels sont contenus la première nappe d'eau souterraine généralement libre ».

* En 1980, Melle M.F PARASCANDOLA précisait que « définir le degré de vulnérabilité suppose que l'on ait su caractériser les agressions et les défenses, que l'on ait su convoler les fonctions d'agressions et de défenses, que l'on ait défini une fonction de vulnérabilité que l'on ait fixé une échelle de vulnérabilité ».

* En 1982, G.CASTANY écrivait « la vulnérabilité des nappes à la pollution est leur sensibilité aux différents facteurs physiques stables, déterminant la mesure où elles sont, dans des conditions naturelles, plus ou moins exposées à la pollution à partir de la surface du sol. Elle étudie les possibilités de propagation dans l'espace souterrain. Celle-ci est, en premier lieu, liée à l'autoépuration naturelle du sol, donc à la présence de conditions indispensables à son action. En second lieu, elle est favorisée par la circulation de l'eau. »

II-2 : Différentes méthodes d'estimation de la vulnérabilité :

Les premières cartes de vulnérabilité à la pollution sont apparues dans les années soixante dix (Albinet et Margat, 1970). Ces dernières constituent des synthèses de quelques grandeurs et peuvent être rangées en trois (03) groupes fondamentaux selon les méthodes utilisées :

- Méthodes orientées sur un système de cotation numérique.
- Méthodes orientées sur les documents cartographiques.
- Méthodes générales ou mixtes.

II-2-1 : Méthodes orientées sur les systèmes de cotation numérique

L'intérêt de ces méthodes consiste à donner une approche synthétique et interprétative lors de l'évaluation de la vulnérabilité. L'intégration des paramètres physiques de l'aquifère est très importante pour une bonne estimation du domaine souterrain.

II-2-1-1 : Méthode de SILKA (1978)

Celle-ci est plus facile à réaliser et économique en temps. Elle tient compte de la qualité du polluant. Ses différents paramètres sont répartis comme suit :

- Une description de la zone non saturée (une côte de 1 à 10).
- Une caractérisation de l'extension de l'aquifère (une côte de 1 à 5).
- Une caractérisation physico-chimique de l'eau (une côte de 1 à 5).

Dans le cas de la présence de pesticides, une côte variable de 5 à 8 est mise en place selon cinq critères : La toxicité, la mobilité, la persistance, le volume et la concentration du produit.

Pour désigner la distance d'une région vulnérable localisée à proximité d'un point d'eau, on affecte une côte de 9. L'évaluation du degré de confiance est réalisée par l'introduction d'une lettre d'appréciation (exemple A : bonne estimation).

Cette méthode n'envisage aucune représentation cartographique, l'index de vulnérabilité permet la classification des régions selon leur degré de vulnérabilité

II-2-1-2 : Méthode de THORHIL (DRASTIC) 1985

La méthode a été développée par la NWIA'A (National Water ;Veil Association), son intérêt est d'évaluer les risques de dégradation de la qualité des eaux souterraines. C'est une méthode empirique fondée sur trois (03) axes :

- Son domaine d'application à l'échelle régionale.
- La source initiale de pollution se répand dans le milieu à partir de la surface du sol par l'infiltration.
- La qualité du contaminant n'intervient pas sur le degré de vulnérabilité.

Le terme DRASTIC est l'abrégié des sept (07) paramètres de la méthode. Des côtes sont attribuées pour chaque valeur des paramètres sous forme de tableau. Ensuite, on élabore l'indice DRASTIC qui est égal à la somme des poids par cotes :

Indice DRASTIC général = (Dc.Dp) + (Rc.Rp) + (Ac.Ap)+(Sc.Sp)+(Tc.Tp)+(Ic.Ip)+(Cc.Cp)

L'indice permet d'estimer le risque de contamination d'une formation aquifère, ce risque augmente avec la valeur de cet indice

II-2-1-3 : Méthode GOD (Foster et Hirata, 1991)

Dans cette méthode, la vulnérabilité est réalisée suivant l'inaccessibilité dans la zone non saturée au sens de l'identification du polluant, cette dernière est basée sur trois (03) éléments -

- Identification de la nature de l'aquifère selon son degré de confiance (Ci)
- La profondeur de la nappe (Cp).
- La particularité de la zone non saturée (porosité, perméabilité, contenu en eau), (Ca).

Dans cette méthode, l'indice de vulnérabilité est le suivant (IGOD = Ci * Cp*Ca)

II-2-1-4 : Méthode PRAST

Dans cette méthode, on voit l'apparition d'un nouvel élément (P pouvoir épurateur du sol) qui regroupe trois paramètres (D, I, C) de la méthode DRASTIC. En effet, cette démarche facilite la méthode précédente (DRASTIC). Le pouvoir épurateur du sol (P) correspond aux phénomènes de l'autoépuration naturelle du sol qui est le paramètre le plus important dans la méthode.

Les éléments de la méthode sont donnés ci-dessous :

- Le pouvoir épurateur du sol (P).
- La recharge(R)
- Type de l'aquifère (A).
- Type du sol (S).
- La topographie (T)

Comme pour la méthode DRASTIC, chaque paramètre est assigné d'un poids de 1 à 8 et d'une cote de 1 à 10 qui correspond à son importance dans l'atténuation des polluants

II-2-1-5 : Méthode du pouvoir épurateur du sol (Rehse, 1977)

Le pouvoir épurateur du sol, puis celui de la zone non saturée, est important pour éviter la propagation d'une pollution en direction des nappes. La méthode, proposée par Rehse, tient compte de divers mécanismes qui sont étroitement liés. Ce sont les processus physiques, mécaniques et biochimiques qui agissent sur le transport des bactéries sur la dégradation des composés organiques et chimiques qui interfèrent sur le transfert du soluté (SAID .R ,1999)

II-2-2 : Méthodes orientées sur des documents cartographiques

Dans ces méthodes, on tient compte en premier lieu des conditions suivantes :

- La nature du recouvrement (sol et sous sol)
- La profondeur de la nappe:

En seconde partie, on prend en considération l'intercalation des formations aquifères vis-à-vis du polluant; donc tous ces éléments ont été déduits à partir des documents cartographiques

II-2-2-1 : Méthode d'Albinet et de Margat (1970)

Cette méthode se résume à une représentation globale des éléments qui contrôlent la vulnérabilité, à savoir :

- La profondeur de la nappe.
- Le drainage de surface.

- La nature lithologique du sous-sol

En effet, le degré de vulnérabilité est évalué sous forme de classes avec des valeurs bien déterminées.

II-2-2-2 : Méthode wipp (1982)

Cette méthode tient compte des critères suivants :

- La profondeur de la nappe.
- La déplacement de l'eau.
- La perméabilité du sol.
- L'utilisation de l'eau

Cette dernière donne trois catégories de vulnérabilité (Forte. Moyenne, Faible).

II-2-2-3 : Méthode anglaise NRA (National River Authority)

Elle a été évaluée par la NRA en 1992. Ses grands axes de réalisation sont :

- La pédologie (caractéristiques du sol)
- Le contaminant et son rôle comme l'élément principal
- L'épaisseur de la nature de la zone non saturée.

II-2-3 : Méthodes générales ou mixtes

Ces méthodes donnent une approximation globale à partir d'une analyse des critères de la protection des nappes. Elle tient compte de la géologie et de l'hydrogéologie

II-2-3-1 : Méthode de Vierhuff (1982)

Cette dernière dépend des paramètres suivants :

- La nature du sol et la zone non saturée.
- La profondeur de la nappe.
- Le régime hydrologique.

Ces paramètres précédents ont été groupés par Vier Huff en cinq (05) classes (de forte à très forte vulnérabilité).

II-2-3-2 : Méthode de Villumsen et Sonderskov (1982)

Ces derniers ont proposé quatre (04) paramètres, l'un d'eux compte de la variation du niveau piézométrique échelonné sur des cotes correspondantes, les autres dépendent de:

- La capacité d'adsorption du sol
- La zone saturée et ses caractéristiques.

II-2-3-3 : Méthode de Haerté (1983)

Dans cette méthode deux critères essentiels sont retenus :

- L'épaisseur de la zone vadose (zone non saturée).
- La perméabilité de la formation aquifère.

Cette méthode est classée suivant l'épaisseur des formations et leur nature lithologique ; en effet le domaine de classification varie entre faible, moyenne et haute.

III- Aspects théoriques et pratiques de la méthode PRAST.

La méthodologie PRAST est une version simplifiée de la méthode DRASTIC. Elle consiste en un remplacement des trois paramètres (D), (C) et (I), difficile à acquérir ou à quantifier, par un seul paramètre qui est le pouvoir épurateur vertical (P) définie par Rehse (1977).

Le pouvoir épurateur du sol et celui de la zone non saturée, sont importants pour éviter la propagation d'une pollution en direction des nappes. Ils jouent un rôle particulièrement déterminant vis-à-vis des problèmes d'assainissement individuel, de pollution par les décharges et les épandages.

Dans le cas des captages des nappes alluviales, implantés près d'une rivière l'effet filtre des berges, peut limiter la pollution de la nappe par le cours d'eau. Cependant, il semble que dans le cas d'une pollution par les métaux lourds, le pouvoir épurateur des sédiments des berges ne suffise pas et que certains métaux soient remis en circulation par désorption ne sont pas retenus.

La concentration du polluant peut avoir considérablement diminué à son entrée dans la nappe si le pouvoir épurateur du sol et de la zone non saturée est efficace.

A noter à ce propos, qu'en Allemagne et en Suisse, le pouvoir épurateur du sol n'est pas pris en compte pour la délimitation des périmètres de protection que si l'épaisseur de la zone non saturée est supérieure à 4m. Cette épaisseur est considérée comme la marge de sécurité permettant des travaux de fouilles, d'excavations et de tranchées.

III-1 : Les paramètres PRAST :

Dans cette méthode, le paramètre le plus important utilisé est le pouvoir épurateur vertical du sous-sol (P) qui intègre la nature du matériel de la zone non saturée, son épaisseur, sa

perméabilité verticale et la profondeur de la nappe. Elle utilise également quatre (04) paramètres de la méthode DRASTIC, en l'occurrence :

- La recharge nette (R) ;
- Le type d'aquifère (A) ;
- Le type de sol (S) ;
- La topographie (T).

Les initiales de ces cinq paramètres constituent l'acronyme PRAST.

III-1-1 : Recharge nette

La recharge nette est le paramètre le plus délicat à évaluer à cause de sa dépendance de plusieurs facteurs (climatologiques, géologiques et topographiques). Généralement, après consultation des rapports hydrogéologiques et hydrologiques, c'est à l'utilisateur de décider. L'infiltration efficace est le seul paramètre responsable de la recharge des nappes (il représente le moyen de transport du polluant vers le milieu aquifère) dont l'augmentation accroît le potentiel polluant. Cette conclusion n'est valable que lorsque l'infiltration provoque la dilution du polluant. Mais, puisque ce point est difficile à évaluer, le système de cotation ne reflète pas le facteur de dilution.

Pour un site donné, en plus de l'estimation du taux d'infiltration des précipitations, il faut tenir compte des eaux d'irrigation, de l'alimentation artificielle des nappes et du rejet de substances liquides.

III-1-2 : Nature du matériel aquifère

Le milieu aquifère ou la zone saturée est le lieu approprié où peuvent être stockés des quantités d'eaux importantes. Son rôle dans l'atténuation du polluant dépend de la nature lithologique et texturale des formations qui constituent le milieu aquifère. Le potentiel de pollution est proportionnel au degré de porosité des terrains qui constituent l'aquifère, en particulier la perméabilité des interstices et des fissures.

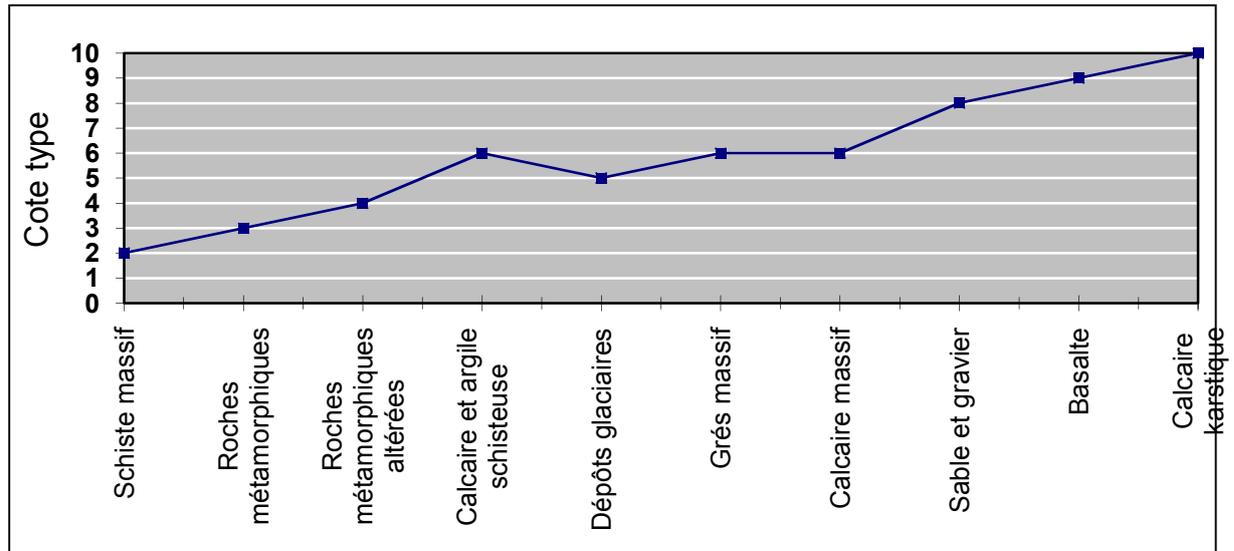


Figure V-1 : Représentation graphique de la variation de la cote en fonction des caractéristiques du milieu aquifère (Aller *et al.*; 1987 in Touileb, 1997).

III-1-3 : Type de sol

On s'intéresse à la couche végétale du sol de 1 à 2,5m d'épaisseur, siège d'une activité biologique et chimique intense. Le sol au sens pédologique du terme résulte de l'altération des roches mères. Le SCS « soil conservation service » a établi en 1984 une classification des sols sur la base du potentiel de pollution décroissant :

- Peu épais ou absent ;
- Graviers ;
- Sables ;
- Tourbes, matières organiques non décomposées ;
- Couches très minces et/ou en association de couches d'argiles ;
- Terres grasses limono-sableuses ;
- Terres grasses équilibrées en argiles, limons et sables ;
- Terres vaseuses, limoneuses ;
- Terres argileuses, limono-argileuses ;
- Matières organiques décomposées ;
- Argiles non épaisses et non en association.

L'attribution d'une côte standardisée pour un type de sol repose essentiellement sur la granulométrie. Une côte élevée, reflétant des conditions de haute vulnérabilité, est ainsi attribuée

aux sols caractérisés par des particules grossières. Pour la sélection d'un type de sol, il est recommandé de :

- Consulter la carte générale de l'occupation du sol ;
- Définir les grandes classes de type de sol ;
- L'adaptation de la texture du sol à la classification du « soil conservation service ».

III-1-4 : Topographie

La variation de la pente des terrains contrôle la possibilité d'infiltration des polluants :

- Les terrains dont la pente est supérieure à 18 %, sont caractérisés par un ruissellement important qui favorise l'évacuation des substances polluantes vers l'aval ;
- Les secteurs de pente comprise entre 0 et 6% à l'origine sont plus favorables à l'infiltration d'eau éventuellement polluée.

III-1-5 : La méthode utilisée pour l'estimation du pouvoir épurateur :

Une méthode empirique mise au point par Rehse (1977) consiste à estimer dans quelle mesure un polluant déversé à la surface du sol verra sa teneur diminuer après un parcours vertical jusqu'à la nappe, puis un parcours horizontal dans la nappe jusqu'au point de prélèvement ou de détection. Pour ce faire, des indices sont attribués aux différents types de roches, sur la base de :

- Leur perméabilité et de leur porosité ;
- La surface spécifique et du pouvoir de rétention des grains qui les constituent ;
- Du temps de parcours nécessaire pour une auto épuration ;
- Du volume utilisé (épaisseur de la couche) pour une épuration ;
- Leur teneur en matière organique.

Les différentes catégories de sols pouvant être rencontrées ont été classées en fonction de leur granulométrie. De plus, l'auteur a défini les épaisseurs de sol nécessaires, en condition non saturée, pour une épuration des eaux polluées.

Le pouvoir épurateur des terrains est calculé par la formule :

$M_x = M_d + M_r$ avec M_x : pouvoir épurateur de la totalité du transfert ;

M_d : pouvoir épurateur sur le trajet vertical ;

M_r : pouvoir épurateur sur la distance horizontale.

L'épuration est **complète** si : $M_x = 1$

Sur le trajet vertical, le pouvoir épurateur est égale à : $Md = h_1I_1 + h_2I_2 + h_3I_3$

Avec h_1, h_2 et h_3 : hauteur des différentes catégories de terrains rencontrées et I_1, I_2 et I_3 : index correspondants (Tableau III-1).

Tableau V-1 : Pouvoir épurateur du sol dans la couverture (zone non saturée)

Rehse 1977.

M	DESCRIPTION DU MATERIAU	H (m)	L = L/ H
1	Humus, 5-10% argiles	1,2	0,8
2	Argiles sans fentes de retrait, limons argileux, sables très argileux	2	0,5
3	Silts argileux à silts	2,5	0,4
4	Silts, sables silteux, sables peu silteux et peu argileux	3- 4,5	0,33-0,22
5	Sables fins à moyens	6	0,17
6	Sables moyens à grossiers	10	0,1
7	Sables grossiers	15	0,07
8	Graviers silteux, riches en sables et en argiles	8	0,13
9	Graviers peu silteux, beaucoup de sables	12	0,08
10	Graviers fins à moyens, riches en sables	25	0,04
11	Graviers moyens à grossiers, peu de sables	35	0,03
12	Galets	50	0,02

Si $Md \geq 1$: l'épuration est totale dans les couches de couverture et la délimitation d'un périmètre de protection rapprochée n'est pas nécessaire selon Rehse.

Si $Md \leq 1$: la dépollution n'est pas totale. Elle doit se poursuivre dans la roche aquifère lors du transfert horizontal.

Soit $Mr = 1 - Md$, le pouvoir épurateur dans l'aquifère, la distance l à parcourir horizontalement pour une épuration totale sera $l = Mr / la$

la : index correspondant au matériau aquifère

l : correspondrait dans ce cas à la limite de la zone de protection rapprochée.

Bolsenkotter (1984) complète la méthode de Rehse, en considérant que l'épuration est très faible dans les milieux fissurés que dans le milieu poreux. Dans la roche fissurée, le pouvoir épurateur est supposé égale à 0,5 ; d'où $l = 0.5 / H$

III-2 : CONSTRUCTION DE LA CARTE DE VULNERABILITE

La méthodologie PRAST est axée sur une cotation numérique de la vulnérabilité. Elle permet l'établissement des cartes de vulnérabilité qui forment une synthèse des connaissances lithologiques, pédologiques et hydrogéologiques d'une région.

L'établissement d'une carte de vulnérabilité selon la méthode PRAST se fait selon les étapes suivantes :

- Constitution d'une banque de données, de la région d'étude d'un inventaire du patrimoine documentaire par une bonne recherche bibliographique permettant d'évaluer tous les paramètres ;

- Attribution d'une côte à chaque paramètre, ensuite la côte de chaque paramètre est multipliée par un poids relatif (voir annexe7)

- Une carte thématique réalisée pour chacun des paramètres considérés par la méthode utilisée.

- Sur chaque carte sont délimitées les zones en fonction des intervalles établies par le système de cotation PRAST.

- Réalisation d'une série de superpositions de cinq couches afin de visualiser les intersections des grandes unités hydrogéologiques ainsi que les sous-unités correspondantes ;

- Calcul de l'indice de vulnérabilité général pour chaque unité hydrogéologique obtenue et chaque sous-unité déduite ;

- L'attribution des couleurs conventionnelles (Tableau 2) aux différentes unités hydrogéologiques, permettra de lire la carte synthétique de vulnérabilité ainsi qu'une visualisation graduelle du degré de vulnérabilité : les couleurs rouge, orange, et jaune indiquent les sites à fort potentiel de vulnérabilité et les couleurs bleu, indigo et violet caractérisent les zones moins sensibles.

Tableau V-2 : Code international des couleurs pour les intervalles de l'indice PRAST
(Aller et al ; 1987 modifié, in Touileb, 1997).

Intervalles de l'indice global Méthode PRAST	Couleurs
< 30	Violet
030 – 039	Indigo
039 - 049	Bleu
050 – 069	Vert foncé
070 – 099	Vert clair
100 – 109	Jaune
110 – 129	Orange
> 129	Rouge

III-3 : CARTOGRAPHIE ASSISTEE PAR ORDINATEUR :

Les Systèmes d'Information Géographiques sont des outils créés pour aider la gestion du territoire. Un SIG peut être perçu comme un outil d'analyse, de structuration et de synthèse de données dans un contexte global.

L'analyse et l'expression de la vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions ont été, dès le départ, indissociables de la représentation cartographique. L'image est le support de communication le plus efficace et la carte étant par définition le mode d'expression privilégié des distributions des caractères dans l'espace.

Pour appliquer la cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe des alluvions de la Mitidja Centre et ouest, nous utiliserons le logiciel **MapInfo 6.5** avec l'incorporation de **Surfer** pour l'établissement des grilles. Ces logiciels fonctionnent sous environnement Windows, ils permettent de représenter des données d'une base sous forme d'entités spatiales.

III-3-1 : Réalisation des cartes thématiques et description des paramètres :

Ces cartes ont été établies en fonction du système d'indexation inséré dans l'Annexe N°7.

Elles sont réalisées pour chaque paramètre (PRAST). Ces cartes, se caractérisent par des zones bien délimitées par un indice de vulnérabilité partiel correspondant au paramètre considéré.

Le nombre de cartes dépend du nombre de paramètres, en effet, on a cinq (05) cartes thématiques d'indice de vulnérabilité partiel (de la Figure V-2 à la Figure V-6).

Ces dernières illustrent la répartition spatiale de chaque paramètre PRAST, présenté sous forme de plage, de vulnérabilité faible à élevée.

III-3-1-1 : Carte du paramètre « P », Pouvoir épurateur :

L'estimation du pouvoir épurateur du sol et du sous sol ainsi que le tracé de la carte (Figure V-2) le représentant, ont été réalisés par le biais de la méthode de Cotation numérique (Rehse, 1977).

Pour ce faire, les différents index des terrains constituant la zone non saturée, ont été calculés sur la base de l'étude d'une centaine de coupes lithologiques de forages.

Sachant que le pouvoir épurateur des terrains est calculé par la formule :

$$M_x = M_d + M_r \quad \text{Avec :}$$

M_x : pouvoir épurateur de la totalité du transfert ;

M_d : pouvoir épurateur sur le trajet vertical ;

M_r : pouvoir épurateur sur la distance horizontale.

$$M_d = h_1 L_1 + h_2 L_2 + h_3 L_3$$

Avec h_1, h_2, h_3 : hauteur de différentes catégories des terrains rencontrées et L_1, L_2, L_3 : index correspondants.

La carte du pouvoir épurateur du sous sol de la Mitidja -Est a été établie sur la base de l'application de la méthode de Rehse qui consiste, à estimer l'auto-épuration des polluants lors de leur transfert vertical dans le sous sol.

- Une zone localisée dans la région d'oued Hamida jusqu'à l'est de la plaine où le pouvoir épurateur vertical est inférieur à 1. Donc la dépollution n'est pas totale, autrement dit la pollution peut traverser les couches de couverture et atteindre la nappe.
- Une zone qui s'étend sur toute la partie ouest de la plaine où le pouvoir épurateur vertical est supérieure à trois (03).

Cela signifie que l'épuration est totale dans les couches de couverture et que la délimitation d'un périmètre de protection rapprochée des forages n'est pas nécessaire selon Rehse. De plus, on distingue une zone située à l'oued Karma et à l'oued Zouine caractérisée par un pouvoir épurateur qui varie de 1 à 2.

III-3-1-2 : Carte du paramètre « R », la recharge nette:

Ce paramètre assigné d'un poids égale à 4 est classé juste après le paramètre "P".

Dans notre cas il a été déduit à partir d'un modèle mathématique de Mac Donald et Partners Limited(1992) la recharge est provient des eaux de précipitation et d'autres sources ex:(relation oued / nappe).

La carte de paramètre "R" révèle deux zones caractérisées par des indices de vulnérabilité partielle différente.

- Une zone qui occupe presque toute la plaine étudiée, caractérisée par un indice de vulnérabilité partiel $IR = 24$. La recharge varie dans cette région de 10cm/an à 15cm/an.
- Une zone localisée au Sud -Ouest de la région d'étude caractérisée par un indice de vulnérabilité partiel $IR = 36$. Par conséquent, la recharge annuelle varie de 47cm à 50cm.

III-3-1-3 Carte du paramètre « A », nature du milieu aquifère :

Les matériaux qui constituent l'aquifère et ceux de la zone non saturée sont identifiés à partir de la description des coupes de forage inventories dans toute la plaine.

Signalons dans ce cas qu'il y a un manque de données nécessaires pour une bonne répartition des forages sur la plaine de la Mitidja.

La carte du paramètre "A" montre une seule zone caractérisée par un indice de vulnérabilité partiel $IA = 21$ correspond à un aquifère sableux graveleux.

III-3-1-4 : Carte du paramètre « S », nature du sol :

La carte de la nature du sol a été dressée sur la base des résultats de l'étude agro pédologique de la plaine de la Mitidja (Ecrément, Y 1972). La zone d'étude représente toutes les catégories des sols qui ont été reconnus par l'analyse des profils pédologiques.

- Sols minéraux bruts : Ils sont observés sur les roches qui n'ont pas subi d'évolutions pédologiques. On distingue les Lithosols localisés à l'Est de la plaine et les sols minéraux bruts d'apport alluvial qui se sont formés sur des dépôts très récents des oueds. Ces derniers sont rencontrés sur les cônes de déjections et sur les bras morts des oueds principaux.
- Les sols peu évolués : Ils se subdivisent en sols d'apport colluvial formé sur des matériaux du quaternaire récent et sont rencontrés sur le flanc sud du sahel et en bordure de l'Atlas et en sols peu évolué d'apport alluvial développés souvent sur les alluvions du Rharbien récent.
- Les vertisols : Ce sont des sols à profils plus ou moins homogènes dont les horizons ne se distinguent que par la structure et par les conditions de drainage externes.
- Les sols a sesquioxyde de fer : Cette classe de sol est définie par un développement de profils caractérisés, dont le cadre climatique de l'étude par la sous classe des rouges ou sols perialletiques.

Dans ces sols la fraction argileuse prend génétiquement une importante prépondérante.

Les sols hydro morphes : Ces sols sont développés sur les matériaux Rharbiens à texture les plus souvent argileuse à argilo-limoneuse. Ils occupent la basse plaine de la Mitidja. Sur la carte de type de sol, on observe une prédominance des sols de type limoneux-argileux caractérisés par un indice de vulnérabilité $IS = 6$. Ce sont des sols qui préservent la nappe contre la propagation des polluants. Il y a aussi des sols de nature limoneux qui se présentent au sud et au sud-ouest de la plaine qui sont plus au moins perméables avec un indice de vulnérabilité $IS = 10$.

III-3-1-5 : Carte du paramètre « T », la topographie :

La carte des pentes de la plaine de la Mitidja ne dépasse pas 10% d'inclinaison, par conséquent la plaine est presque plate et caractérisée par un indice de vulnérabilité $IT = 10$.

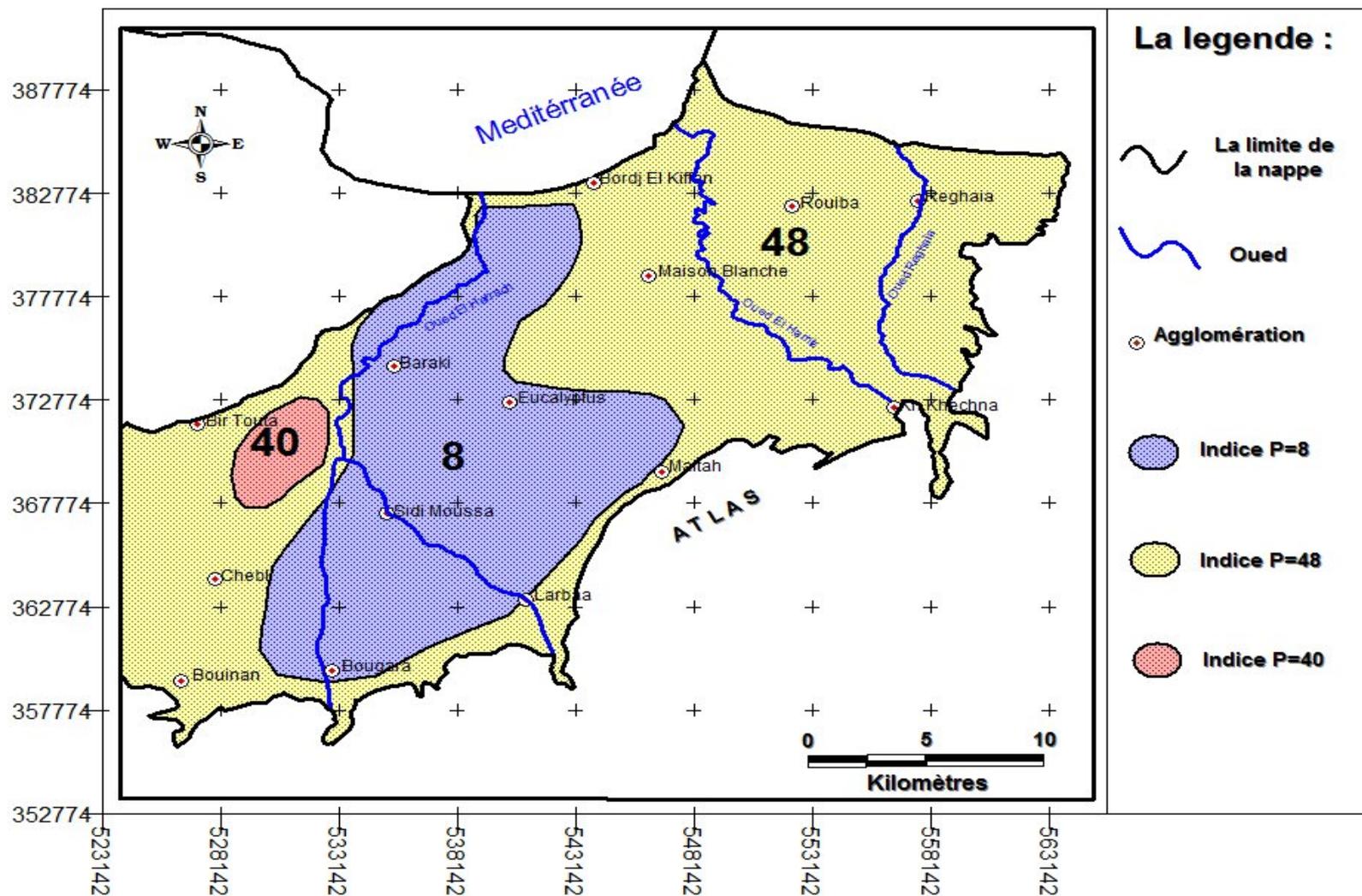


Figure V-2: Carte du paramètre « P », Le Pouvoir épurateur.

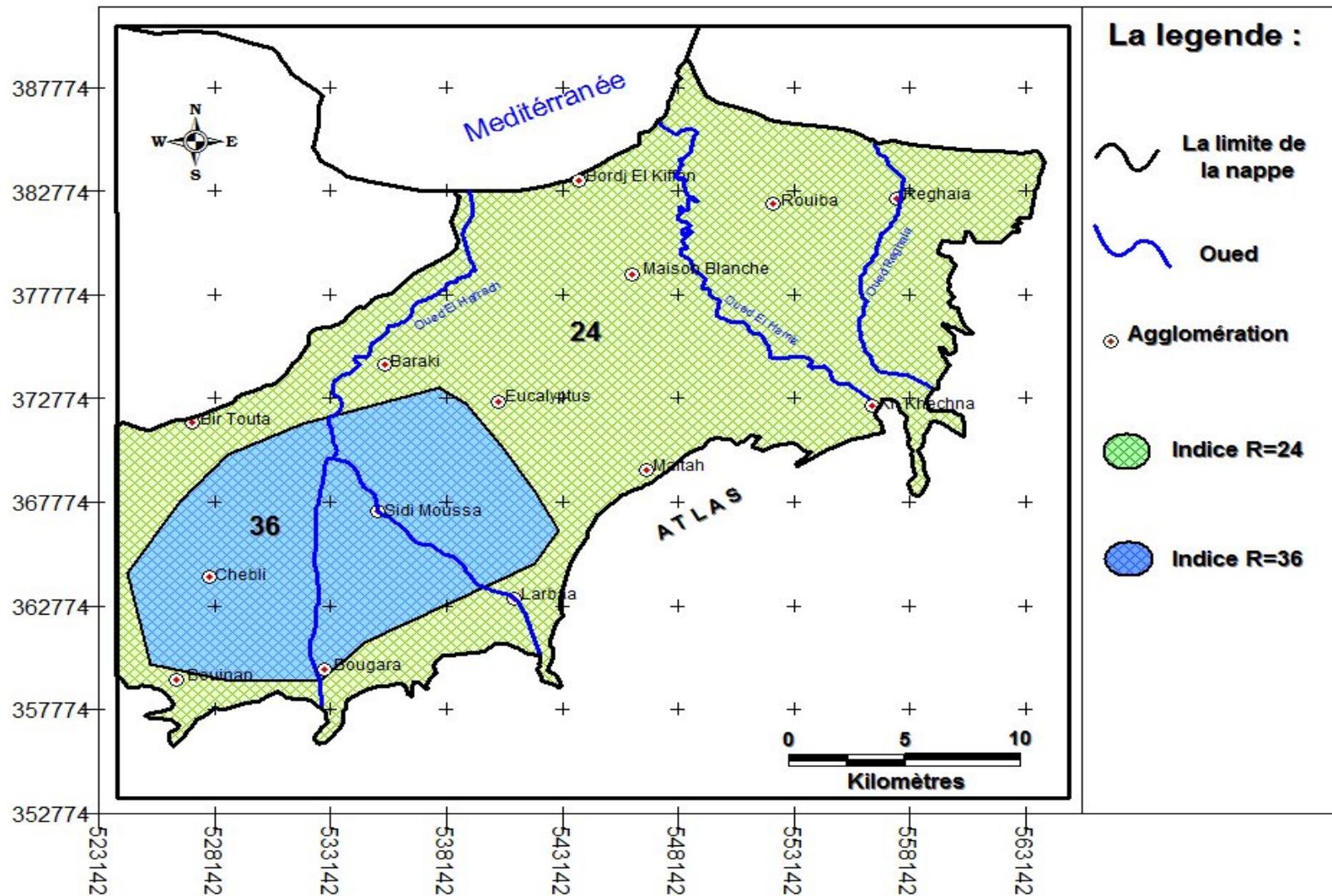
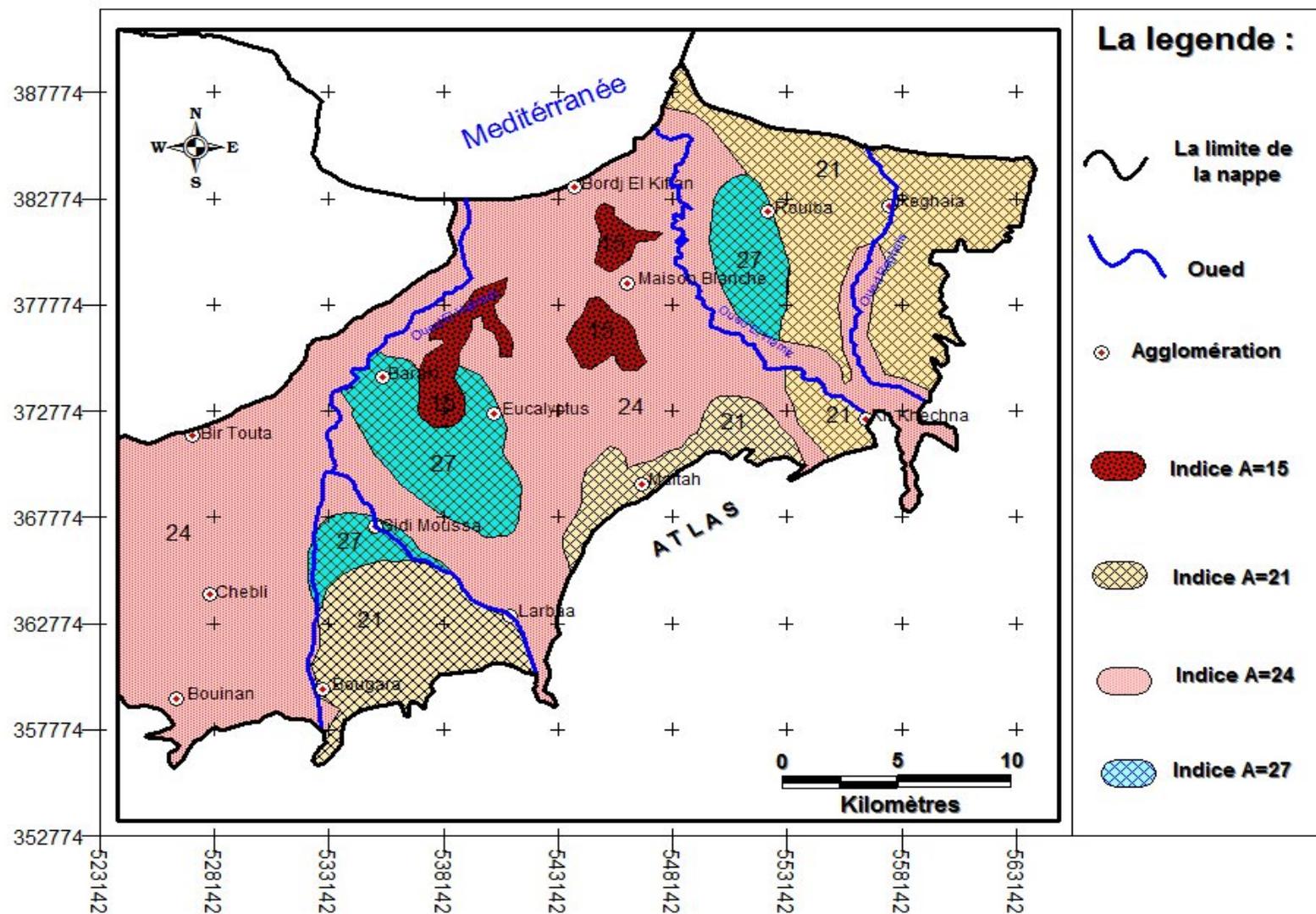


Figure V-3: Carte du paramètre « R », la recharge de la nappe.



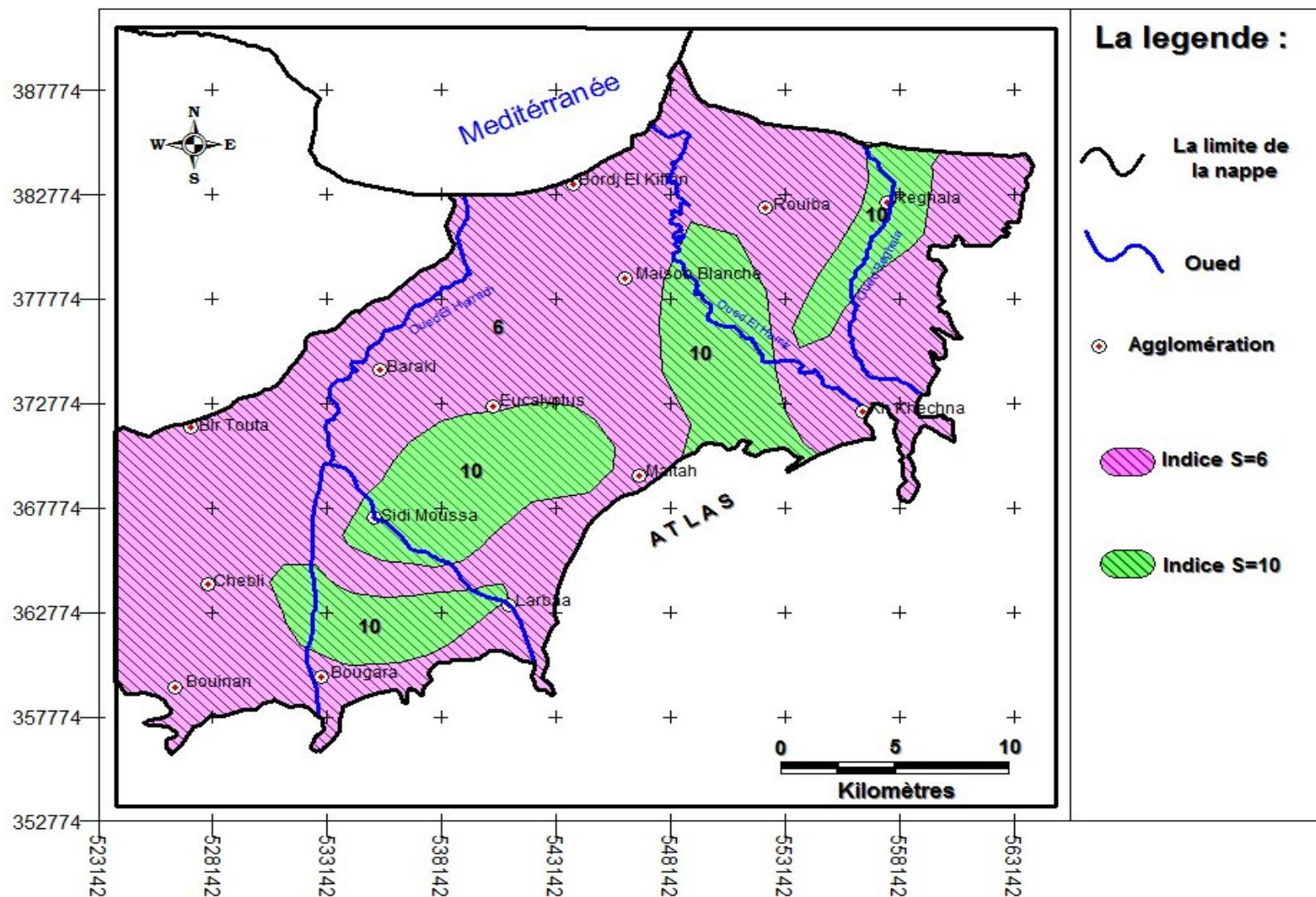


Figure V-5: Carte du paramètre « S », type de sol.

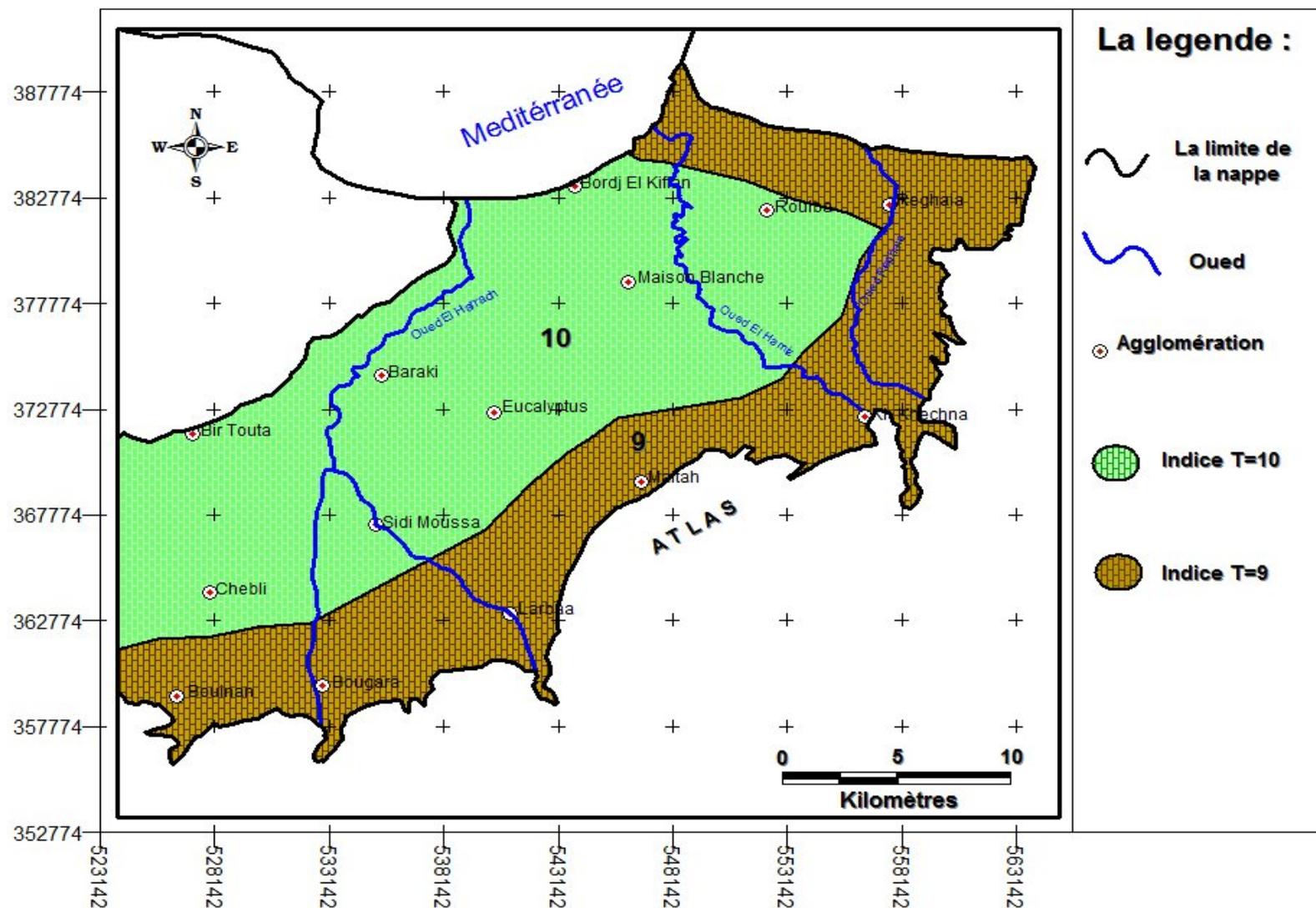
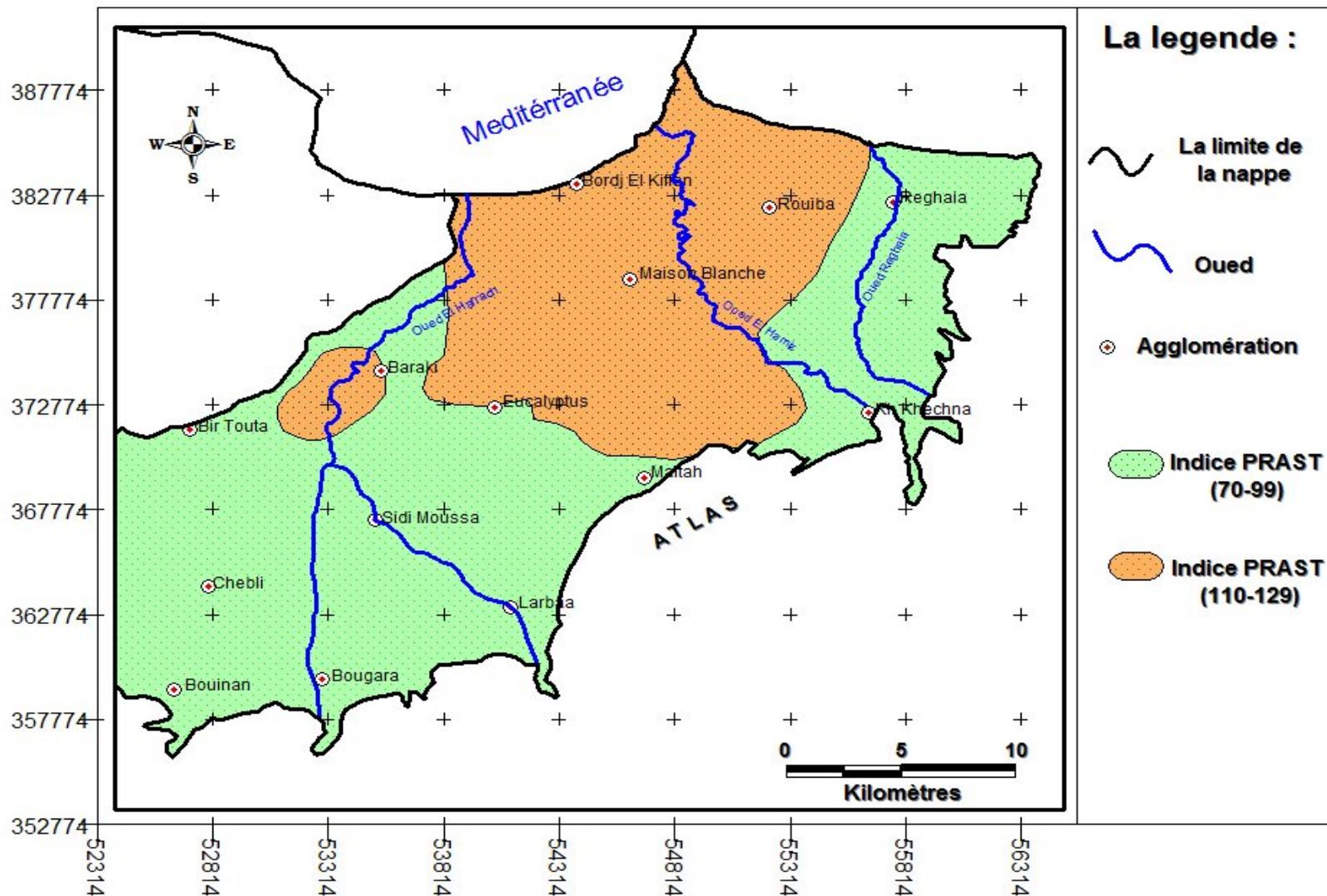


Figure V-6 : Carte du paramètre « T », nature de la topographie.



III-3-2 : Réalisation de la carte de vulnérabilité finale et hiérarchisation des unités hydrogéologiques:

La combinaison des cinq cartes thématiques établies permet de dresser la carte de vulnérabilité de la nappe de la Mitidja Est, selon la méthode PRAST (Figure V-7).

Interprétation de l'indice PRAST

Pour évaluer la vulnérabilité par la méthode PRAST, nous avons adopté la classification donnée par le diagramme suivant:

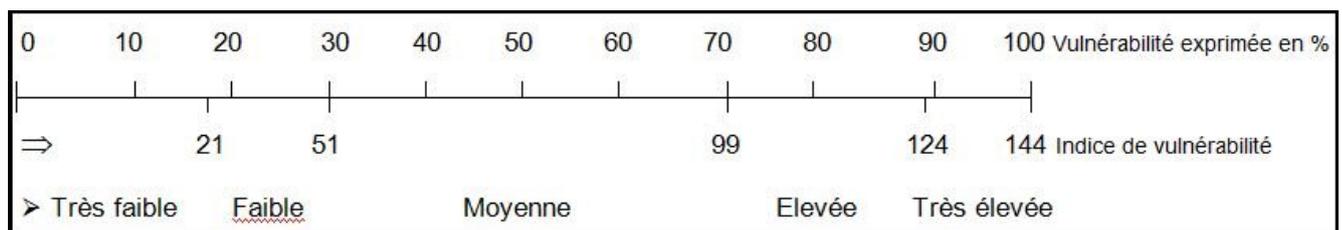


Figure V-8 : Diagramme des classes de vulnérabilité selon la méthode PRAST (Touileb, 1997).

Identification et commentaire sur les différentes unités hydrogéologiques

Cette carte nous permet de distinguer deux unités hydrogéologiques caractérisées par des indices PRAST différents qui définissent des conditions de vulnérabilité moyenne et élevée. Nous décrirons particulièrement la variation du paramètre (P) relatif au pouvoir épurateur vertical. Unité hydrogéologique 2A:

Cette unité est caractérisée par un indice de vulnérabilité moyen de 68 à 84: La recharge est égale à 50cm/an.

L'aquifère saturé est constitué par des sables et des graviers qui forment l'ensemble de la nappe.

La couverture est constituée par des argiles et des limons. Par ailleurs, le paramètre le plus important qui caractérise la méthode PRAST c'est le pouvoir épurateur vertical qui permet la classification des aquifères selon la granulométrie des couches qui constituent le sol et la zone non saturée dans cette unité hydrogéologique est supérieure à 1. Cela signifie que l'autoépuration dans les couches qui recouvrent l'aquifère est total.

Cette unité est localisée à l'ouest de la zone d'étude près des régions de Baraki, Sidi Moussa, l'Arbaa, les Eucalyptus.

I- Introduction

Le problème de drainage agricole se pose lorsqu'il y a un excédent d'eau qui est nuisible à la croissance des cultures. Cet excédent peut se produire soit sur la surface du sol stagnation de l'eau sur la surface, souvent combinée avec l'engorgement de la couche superficielle, soit dans le sous-sol (saturation prolongée de la zone racinaire liée à un mauvais drainage interne du sol et/ou à une nappe élevée).

Les deux causes qu'on a citées sont liées à la texture du sol ; donc grâce à la pédologie de la Mitidja, on a choisi une zone d'application qui permettra de déterminer le débit de drainage.

II- Besoin en eau du périmètre:

Les besoins en eau des cultures, peuvent être définis comme dose apportée à la plante dans des moments propices, afin de mettre celle-ci dans les meilleures conditions d'humidité requises, pour obtenir son rendement maximal.

L'évaluation des besoins en eau du périmètre est basée sur la détermination des besoins de chaque culture retenue dans le calendrier agronomique.

En ce qui concerne notre cas, le calcul des besoins en eau des cultures est effectué à l'aide du logiciel CROPWAT version 8, qui permet au passage, l'évaluation de l'évapotranspiration de référence, selon la méthode empirique la plus appropriée de Penman&Monteith modifiée.

On à :(Hamiz) on choisissant une tranche de 150Ha repartis comme suit :

Tableau VI-1 : tableau de représentation de la Répartition des cultures :

cultures	Répartition (HA)
Tomate	8
P. terre	60
Agrumes	47
vignes	35

II -1 : Calcul des précipitations annuelles :

Les lois d'ajustement sont nombreuses et ne peuvent être appliquées à un échantillon que si les conditions homogénéité-stationnarité sont réunies parmi les quelles :

- Loi de Laplace-Gauss, loi normal, et loi de Galton ou loi log-normale.
 - Loi de Fuller ou loi Exponentielle.
 - Loi Gamma, loi de Pearson I et III.
 - Loi de Gumbel ou loi doublement exponentielle.
- Ces lois comportent deux à trois paramètres estimés par différentes méthodes :
- Méthode des moments.
 - Méthode du maximum de vraisemblance.
 - Méthode du maximum d'entropie.

Les critères de choix sont liés à un ajustement graphique d'abord, et ensuite à un test de dispersion. L'allure des points sur du papier à prime abord d'accepter ou de rejeter la loi.

Le problème posé : Quelle loi choisir lorsque plusieurs d'entre elles sont adéquates ?

Donc les critères de choix pouvant être retenus sont :

- A qualité égale, la loi qui a le moins de paramètres est à retenir.
- A qualité égale et nombre de paramètre égal, il faut comparer les estimations des deux lois ; si ces estimations sont voisines, il faut retenir la plus simple, si elles sont nettement différentes, il faut prendre une nouvelle loi quitte à prendre un paramètre supplémentaire.

a) Ajustement à la loi de Gumbel:

Calcul des pluies :

Les pluies maximales journalières à la plaine de hamiz (zone d'étude) ont été analysées et traitées statistiquement afin d'obtenir des courbes hauteur-durée-fréquence.

II.1.1. Pluies d'une Durée Autre Que 24 Heures : Méthode Directe

A partir des fiches d'observation des pluies journalières, on peut déduire la valeur des pluies de plusieurs jours consécutifs, par exemple sommation des valeurs journalières.

Ainsi on peut déterminer la somme maximale de 2, 3, 4 et plus de jours, un ajustement pareil à celui des maxima journaliers permet d'aboutir à une distribution fréquentielle de la pluie de plusieurs journées.

Cette méthode, assez fastidieuse, se prête bien au traitement par ordinateur, avec un programme simple à élaborer. Néanmoins calculée à la main, elle donne déjà des résultats fiables, qui permettent de tracer la courbe pluie – durée pour les différentes fréquences.

L'intensité et la fréquence d'une durée plus courte qu'une journée peuvent être déterminées d'une façon directe à partir des pluviogrammes. Un pluviographe enregistre la pluie cumulée pendant une journée (une semaine, un mois). Les pluviogrammes sont la représentation graphique de la pluie cumulée qui tombe dans cette période.

L'intensité de la pluie de courte durée est calculée comme suit:

$$i_p = \frac{\Delta}{\Delta} = \text{---}$$

Δ : Intervalle de temps considéré ($t_i - t_0$)

P_0 : La pluie cumulée enregistrée à t_0

P_i : La pluie cumulée enregistrée à t_i

Une analyse fréquentielle des intensités déterminées sur les pluviogrammes de plusieurs années permet d'établir les courbes intensité-durée-fréquence des pluies de courte durée.

L'avantage de l'emploi des pluviogrammes pour l'étude des pluies de courte durée est dans le fait, que l'on peut choisir n'importe quel intervalle de temps. Toutefois, le traitement des pluviogrammes est un travail assez long, vu qu'on a besoin de plusieurs années d'observation.

En outre, les pluviographes sont onéreux et délicats, ce qui fait que toutes les régions ne sont pas dotées de tels appareils.

II.1.2. Pluies de courte durée : Méthodes indirectes

L'analyse fréquentielle de courte durée a montré qu'il existe des rapports empiriques entre la durée d'une averse, son intensité et son temps de récurrence.

On peut déduire deux lois générales :

1°- Une pluie d'une durée fixée à une intensité d'autant plus forte que sa fréquence est plus rare.

2°- Pour une période de récurrence donnée une averse à une intensité d'autant plus forte que sa durée est plus courte.

L'expression mathématique pour ces rapports d'intensité durée fréquence est de la forme suivante :

$$i_p = \frac{a}{t} \text{ (TALBOT), c'est pour des durées inférieures à 5 heures.}$$

$$i_p = a \cdot t^{-n} \text{ (MONTANA), c'est pour les durées supérieures à 5 heures.}$$

Les constantes a, b, à, et n sont des valeurs spécifiques pour une station et un temps de récurrence donné.

Ces paramètres peuvent être déterminés des courbes intensité – durée obtenus par l'analyse directe par la méthode des moindres carrés des droites d'ajustement, ou de leurs logarithmes :

$$i_p = a \cdot t^{-n}$$

$$\log i_p = \log a + n \log t$$

En portant i en fonction de t sur papier double logarithmique, on trouve une droite de pente n et d'ordonnée à l'origine à.

L'expression n dans la formule de MONTANA est souvent fixée à 0,5. En substituant cette valeur, on trouve : $i_p = \frac{a}{\sqrt{t}}$

si l'on connaît l'intensité maximale pour un seul intervalle de temps, on peut déterminer la constantes à, et de la, les intensités pour d'autres durées avec cette même valeur de la constante trouvée.

Exemple de calcul :

Les types de culture sur le champ irrigué : céréales et maraichère la période de retour favorable pour ce type est **U = 2 ans et U=5 ans**

$$\text{L'intensité de cette pluie est } \frac{17}{20} = 0.85 \text{ mm/h}$$

Connaissant l'intensité maximale (0.85mm/h) et la durée de cette pluie maximale (24heures), on peut déterminer la constante à :

$$a = i_p \times \sqrt{t} = 0.85 \times \sqrt{24 \times 60} = 32.26$$

Donc 32.26 est la valeur de à pour la station de MATEMORE (région d'études), pour un temps de retour **U =5ans**. Avec cette constante, on calcule l'intensité de la pluie pour les durées autre qu'un jour, ainsi que la hauteur de pluie totale pour cette même durée est de la formule suivante :

$$P = i_p \times (t /60). \text{ (mm)}$$

Tableau VI-2 : Calcul de la pluie durée à l'aide de la formule de MONTANA

<i>U=5 ans</i>				
<i>Durée(h)</i>	<i>t (min)</i>	<i>a'</i>	<i>i_p (mm/h)</i>	<i>P (mm)</i>
6	360	32.26	1.7	10.2
12	720	32.26	1.2	14.4
24	1440	32.26	0.85	20.4
48	2880	32.26	0.6	28.8
72	4320	32.26	0.5	36
168	10080	32.26	0.32	53.76

Notons que ce calcul empirique se fait seulement par faute des données et qu'il peut introduire des estimations grossières pour les longues durées.

Toutefois il est préférable de vérifier les résultats et en les comparants avec les plus fortes pluies de longue durée réellement observées, mais en cas d'absence totale de données, cette méthode est la plus fiable à utiliser.

En reportant les pluies maximales P en fonction de leurs durées, on obtient la courbe pluie durée représentée sur la figure ci-dessous.

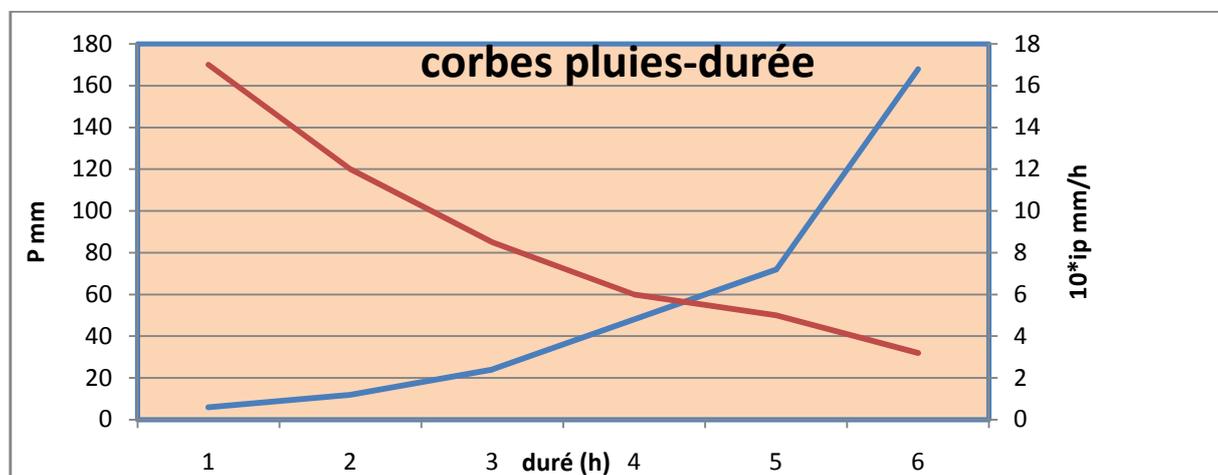


Figure -1 : Courbe Pluie - Durée

Ainsi on arrive à déterminer la pluie critique, qui est la pluie qui tombe dans la durée admissible d'inondation .

Mais, il faut tenir compte du fait que le mois le plus pluvieux ne coïncide pas toujours avec le mois le plus sensible pour les cultures. Si, par contre, une analyse globale des pluies maximales montre que le max peut se présenter dans n'importe quel mois de la saison hivernal, on prendra les pluies maximales déterminé sur toute l'année comme critère, dans

notre cas les céréales occupant la plus grande partie de nos champs, subissent les pertes les plus élevées pendant les mois de mars à juin.

II.1.3 Traitements des données :

On collecte les données de la pluviométrie de la zone à étudier .sur la base d'une série d'observation de plus de 30 ans on procède à l'ajustement suivant :

Classification des pluies de 1jr ; 2jrs ; 3jrs ; 4jrs ; 5jrs ; 6 jours pour chaque mois (par épisodes) soit 1jr unique où 2jrs successives ...Etc.

Ajuster à la loi de GUMBEL, à l'aide de le logiciel Hydrolab (valeurs extrêmes) de la série pour chaque intervalle de référence 1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 jrs.

Et pour chaque intervalle de référence on détermine les précipitations de période de retour soit de 2 ans ; 5 ans ; 10 ans. (Selon la culture).

Le tableau suivant résume nos résultats des données à utiliser.

Ce travail est fait par semestre, et pour notre cas ; On a fait le calcul pour le trimestre (M.A.M) pour le période de retour 5 ans.

Tableau VI-3 : Hauteurs et les fréquences des pluies du semestre de printemps

Durée de la pluie	printemps		
	fréquences		
	2ans	5ans	10ans
1jrs	19,974	31,440	39,032
2jrs	28,247	44,463	55,199
3jrs	34,596	54,456	67,605
4jrs	39,948	62,880	78,064
5jrs	44,663	70,302	87,278
6jrs	48,926	77,012	95,608

Sur la base de ces données, on construit les courbes H.D.F (hauteur, durée, fréquence) à partir desquelles on tire la pluie critique.

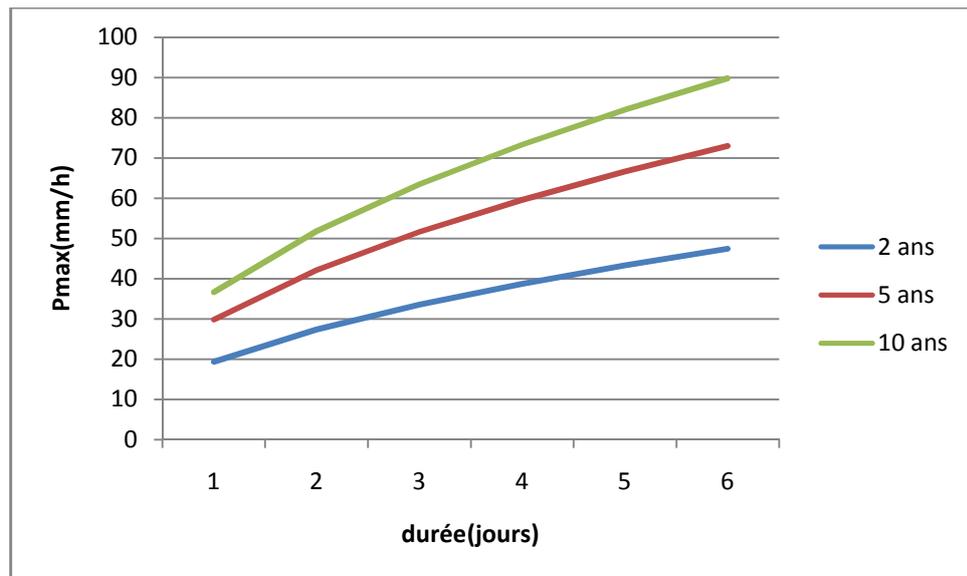


Figure -2 : Les courbes H.D.F (hauteur, durée, fréquence) printemps

b) Détermination de l'année de calcul :

L'estimation sera pour l'année sèche de fréquence 80%; on utilise la formule suivante :

$$P_{\text{moy } 80\%} \text{ de chaque mois} = P_{\text{moy}} \text{ de chaque mois} \times \frac{\dot{e} \text{ (} \%)}{\dot{e} \text{ (} \%)}$$

Donc les valeurs de $P_{i,\text{sec } 80\%}$ devient comme suit :

Tableau VI-4 : Précipitation moyenne mensuelle de l'année de calcul :

Mois	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	annuel
P_{moy} (mm)	27,17	53,15	88,27	95,94	83,22	64,69	54,74	58,69	42,35	8,01	2,56	3,54	582,33
$P_{\text{moy } 80\%}$	21,46	41,98	69,73	75,79	65,74	51,1	43,28	46,36	33,45	6,32	2,02	2,79	460,04

III- : Méthode de PENMAN&MOTHEIT modifiée :

En Angleterre, précisément en 1948, M^r Penman & Motheit a proposé une étude théorique de l'évapotranspiration en reliant inséparablement l'énergie solaire incidente. Cette formule est limitée ou bien incomplète, du fait que cette dernière ne prenne pas en considération l'effet de quelques paramètres météorologiques.

Les expériences ont montrés que la formule telle qu'elle est, s'applique mieux dans les régions humides, non loin de l'océan et essentiellement recouverte de végétation, que dans les zones arides ou semi-arides de faible humidité.

Pour cela, nous adaptons la nouvelle formule de M^r *Penman&Montheit* modifiée, qui prenne en compte l'effet du paramètre vent, ainsi que les corrections supplémentaires qui tiennent compte des conditions météorologiques diurnes et nocturnes.

L'expérience a montré que l'expression obtenue, prédit de près, l'évapotranspiration de référence, non seulement dans des régions humides et fraîches comme en Angleterre, mais aussi dans des zones très chaude et semi-aride. La formule de M^r *Penman&Montheit*, modifiée, se présentant comme suite :

$$ET_0 = C * [W * Rn + (1 - W) * F(u) * (ea - ed)]$$

Où :

ET_0 : Représente l'évapotranspiration de référence, exprimées en mm/jour.

W : Facteur de pondération rendant compte de l'effet de rayonnement à différente température et altitude.

Rn : Rayonnement net en évaporation équivalente, exprimé en mm/jour.

$F(u)$: Fonction liée au vent.

ea : Tension de vapeur saturante à la température moyenne de l'air, en millibars.

ed : Tension de vapeur réelle moyenne de l'air, exprimée en millibars.

La différence ($ea - ed$) constitue le facteur de correction, afin de compenser les conditions météorologiques diurnes et nocturnes.

Dans le tableau, nous représentons l'évapotranspiration de référence ET_0 , calculée à l'aide du logiciel *CROPWAT*. 8, selon la formule de *Penman&Monteith*, modifiée *Tableau*

VI-5 : Evapotranspiration de référence selon la méthode Penman&Monteith :

Mois	Temp Min	Temp Max	Humidité	Vent	Insolation	Radiation	ETo
	°C	°C	%	km/jour	heures	MJ/m ² /jour	mm/jour
sep	18.1	30.1	73	118.32	8.4	18.6	3.76
Oct	14	26	68	58.32	7.2	14.1	2.05
Nov	10	21.1	67	84.24	5.5	9.7	1.6
Dec	7.3	18.3	68	55.2	5.0	8.1	1.26
Jan	5.6	17	67	75.6	5.4	9.1	1.22
Fev	5.7	18	74	54.96	6.2	12.0	1.97
Mar	7.2	19.2	77	50.88	7.4	16.3	2.87
Avrl	8.9	21	76	55.2	8.1	20	3.73
Mai	13	23.5	77	49.2	8.6	22.3	4.12
Juin	16	27.9	79	55.68	10	24.5	5.8
Juil	19	31.4	75	56.4	10.6	24.5	5.8
Aout	20.1	32.4	73	53.52	9.8	23	5.19
moyen	14.4	20.5	73	63.96	7.7	16.9	3.20

a) La pluie efficace:

Pour tenir compte des pertes, le programme *CROPWAT.8*, nous permettra de calculer la précipitation efficace, définie comme étant la fraction des précipitations contribuant effectivement à la satisfaction des besoins de l'évapotranspiration de la culture après déduction des pertes par ruissellement de surface, par percolation en profondeur, ...etc.

b) Détermination des besoins en eau d'irrigation :

Les besoin en eau d'irrigation (B), est la quantité d'eau que l'on doit apporter à la culture pour être sur qu'elle reçoit la totalité de son besoin en eau.

L'appréciation des besoins en eau des cultures, par le logiciel **CROPWAT**, nécessite l'introduction des renseignements ci après :

Les besoins théoriques mensuels sont déterminés par le bilan hydrique

$$B = ETP - (P_{\text{eff}} + \text{RFU})$$

B : besoin en eau d'irrigation (mm)

E.T.P : évapotranspiration (mm / jour)

RFU : réserve facilement utilisable

$$\text{RFU} = Y (H_{\text{cc}} - H_{\text{pf}}) \cdot \text{Da} \cdot Z$$

Y : degré de tarissement

Da : densité apparente

Z : profondeur d'enracinement mm

Hcc : humidité à la capacité au champ

Hpf : humidité au point de flétrissement

P_{ef} : pluie efficace

P_{ef} = A. Pluie ; ou A = 0,8 à 0,9 (pour notre cas on a prendre A = 0,8

L'irrigation est fait lorsque B > 0,

- Pour notre travail on a utilisé le logiciel CROPWAT

Le résultat de calcul des différents cultures est résumé dans le tableau qui suivant:

Tableau VI-6: Besoins en eau des cultures en (mm) :

Désignation	Répartition (ha)	Besoins mensuel Mois (mm)											Total	
		S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt		A
Tomate	8	91,9	6,1							25,6	99,7	171,3	171,1	565,6
P. terre	60							0,11	22,4	101	169	105,3		397,81
Agrumes	47	52,3	5,7					16,8	27,7	50,8	99,5	110,5	99,2	367,7
vigne	35	76,5	4,6						17,8	72,6	31,9	144,3	127,2	474,9
Total	150	220,7	16,4					16,91	67,9	250	400,1	531,4	397,5	1900,91

IV- Calcul du débit caractéristique du réseau « q_c » :

Définition :

Le débit caractéristique d'un réseau du drainage est le débit par unité de surface à véhiculer par le réseau pour évacuer la pluie critique.

IV-1 : Cas où l'excès provient la pluie critique:

IV-1-1 Détermination de la pluie critique :

La pluie critique c'est la quantité d'eau que la plante ne peut pas supporté pour sa croissance pendant un temps limité, et grâce à cette dernière on dimensionne un réseau de drainage.

La détermination de la pluie critique se fait par :

Courbe hauteur –durée –fréquence

On utilise les courbes Hauteur- Durée- Fréquence de la station de HAMIZ pour la parcelle ; le calcul de la pluie critique est basé sur les données de la durée de la submersion et la période de retour qui ont été déterminées à partir du tableau suivant :

Tableau VI- 7 : paramètres usuelles des cultures.

Type de culture	Hopt(mm)	Θ : durée de submersion en jour	T (années)	Valeur du coefficient (1-e)
arboricultures	0.8	5	5	0.5
Culture maraichère	0.5a0.6	2	2	0.8a0.9
céréale	0.6	3	2	0.6a0.8

Les valeurs de la pluie critique sont résumées dans le tableau suivant pour le trimestre (m-a-m).

Tableau VI- 8 : pluie critique (mm)

pluie critique (mm)	
Trimestre	Trimestre n°3
Maraîchages	29,87
arboricultures	54,08

Remarque : la valeur exacte de la pluie critique d'une culture dépend de son stade de développement et sa sensibilité à l'excès l'eau. Donc les périodes sensibles de notre culture est comme suit:

- Pour arboricultures: le printemps (Tr n° 3).

Les résultats de la P_{Cr} finales est dans le **tableau VI-9**.

Tableau VI-9: la pluie critique finale en (mm).

cultures	Maraîchages	arboricultures
pluie critique (mm)	29,87	54,08

Le calcul du débit se fait pour les deux régimes hydrauliques permanent et variable ; sans stockage et en tenant compte du stockage

IV-1-2 En régime permanent :

a) Sans stockage :

Le débit caractéristique dans ce régime (sans stockage) définie par la formule ci-dessous

- $q_c = (1 - e) \times i_p$ q_c : en mm/h

- $q_c = \frac{1}{24} \times i_p$ q_c : en l/s/ha

i : Intensité de la pluie en (mm/h) avec : $i = \frac{1}{24}$

(1-e) : coefficient de la quantité d'eau non évaporé.

Le coefficient (1-e) est déterminé à partir du tableau suivant :

Tableau VI-10 : les coefficients (1-e) en fonctions du type de culture et du sol.

Cultures	1- e
Prairies	0,5-0,6
Céréales	0,6-0,8
Maraîchages	0,8-0,9
Arboricultures	0,5

Source : Land Drainage. SMEDNA

b) En tenant compte du stockage :

Le stockage est une fraction du volume du sol ou les pores remplies avec l'eau de la pluie et sert temporairement comme réservoir ; la formule de débit dans ce cas est:

$q_c = \frac{P - E - S}{W}$ avec

q_c : débit caractéristique en (mm/jours)

- P: pluie critique en (mm).
- E: l'évaporation en (mm).
- t : durée de submersion admissible.
- W : profondeur des drains.
- S : le stockage du sol en (mm) avec $S = h_c \times$

Avec e : La porosité efficace en (%).

h_{op} : C'est la différence entre la profondeur du drain et la hauteur optimale de la nappe.

Les valeurs de la porosité et la hauteur optimale sont tiré à partir des tableaux (VI-10; VI-11).

Tableau VI-11: la porosité efficace en fonction de la texture du sol.

Textures	(%)
sol très argileux	1 à 2
sol limoneux argileux	4 à 8
sable fin	15 à 20
sable grossie	25 à 30

Source : Cours Irrigation.

Tableau VI-12: la hauteur optimale de la nappe en fonction de la culture.

Cultures	h_{op} (m)
maraîchages	0.5 à 0.6
céréale	0.6
praires	0.2 à 0.3
arboriculture	0.8

Source : Cours Irrigation.

IV-1-3 En régime variable :

Le débit du drainage est déterminé grâce à la formule :

$$q_c = -$$

Avec :

- q_c : débit caractéristique en (mm/jours).
- S : le stockage du sol.
- : durée de submersion admissible.

Le choix du site d'application

Dont les propriétés sont données comme suite :

- La hauteur optimale de la nappe :
 - h_{op} pour les maraîchages est de 0.5m.
 - h_{op} pour les arboricultures est de 0.8m.
- Texture: limono-argileuse : donc la porosité efficace μ est de 5%.

- la profondeur du drain est de 0.8m pour les maraîchages et 1.2 m pour l’arboriculture (D’après TCHESKQSSOV URSS).

Donc la $h_c=0,3m$ pour les maraîchages et $h_c=0,4m$ pour l’arboriculture

- pour le régime variable on admet que la nappe remonte jusqu’à la surface du sol (h_1) donc il faut rabattre la nappe jusqu’à la hauteur optimale (h_0) et ceci implique que : $h_c=0,5$ pour les maraîchages et $h_c=0.8m$ pour les arboricultures.

Les débits caractéristiques sont exprimés dans le tableau VI-12 :

Tableau VI-13: le débit caractéristique en (l/s/ha) :

régime	Les débits caractéristiques (l/s/ha)		
	régime variable	régime permanent	
		Sans stockage	Avec stockage
Culture maraîchages	1,44	1,38	0,56
arboricultures	0,74	0,625	0,53

IV-1-4 Cas ou l’excès provient de l’irrigation :

a) Pour la maraichère :

$B_{net}=171,3mm$ pour le mois de pointe, juillet

Période d’irrigation : 15jour /mois c'est-à-dire

$B_{net}=276,6/15= 11,42 mm$

On propose un système d’irrigation par aspersion Efficience de l’irrigation : 0.75

$$B_{brut} = \frac{B_{net}}{\%} = \frac{11,42}{0,75} = 15,22mm$$

Les pertes totales sont estimées a 0.25 donc :

Pertes tot= $15,22*0.25=3,805mm$

Les pertes par percolation : $3,805mm/2j$

$$q_c=3,805/2=1,90mm/j \quad q_c=0,22l/s/ha$$

$q_c=0,22 l/s/ha$

b) pour l’arboriculture :

$B_{net}=144,3mm/mois$ pour le mois de pointe, juillet

Période d’irrigation : 15jour /mois c'est-à-dire

$$B_{\text{net}} = 144,3/15 = 9,62 \text{ mm}$$

On propose un système d'irrigation par aspersion Efficiene de l'irrigation : 0.75

$$B_{\text{brut}} = \frac{\text{---}}{\%} = \frac{\text{'}}{\cdot} = 12,82 \text{ mm}$$

Les pertes totales sont estimées a 0.25 donc :

$$\text{Pertes tot} = 12,82 * 0.25 = 3,205 \text{ mm}$$

Les pertes par percolation : 3,205 mm/2j

$$q_c = 3,205/2 = 1,602 \text{ mm/j} \quad q_c = 0,18 \text{ l/s/ha}$$

$q_c = 0,18 \text{ l/s/ha}$

Résultats et calculs :

Pour tous les calculs qui suivant, on prendra le débit maximal, donc celui du régime variable :

- Pour l'arboriculture $q_c = 1.44 \text{ l/s/h}$
- Pour la maraichère $q_c = 0.74 \text{ l/s/h}$

CONCLUSION :

La plaine de la Mitidja est dotée d'un climat méditerranéen, caractérisé par une température de 18°C avec des précipitations moyennes annuelles de 603.418mm dont 80.39% s'évaporent, 2.55% s'infiltrent et 17,06% ruissellent.

Cette dernière appartient au bassin versant des côtières algéroises qui est un bassin allongé dont l'indice de compacité est de 1.21 indiquant un temps de concentration des eaux à l'exutoire assez lent. Il présente une pente relativement faible favorisant l'infiltration au profit du ruissellement.

L'étude géologique, une synthèse des travaux antérieurs sur la zone d'étude (plaine de la Mitidja Est), correspond à un bassin de subsidence continue renfermant le remplissage Pli quaternaire, ainsi que des roches plus anciennes sur les bordures. Elle nous a permis aussi de définir deux types de nappes :

- la nappe de l'Astien, qui se trouve entre le Plaisancien (le substratum) et les marnes jaunes semi-perméables de la formation d'El Harrach.
- la nappe du Quaternaire, constituée d'alluvions composées essentiellement de graviers et de galets.

L'analyse des cartes piézométriques, notamment celles des hautes eaux, montre un sens d'écoulement global vers le Nord à l'exception de certaines localités au niveau de la baie d'Alger. Sur la bande littorale, allant de Bordj El Bahri à Bordj El Kiffan, est enregistré l'inversement du sens de l'écoulement qui est causé par la forte sollicitation de la nappe dans cette région (surexploitation), et cela pendant l'été comme le montre la carte des basses eaux.

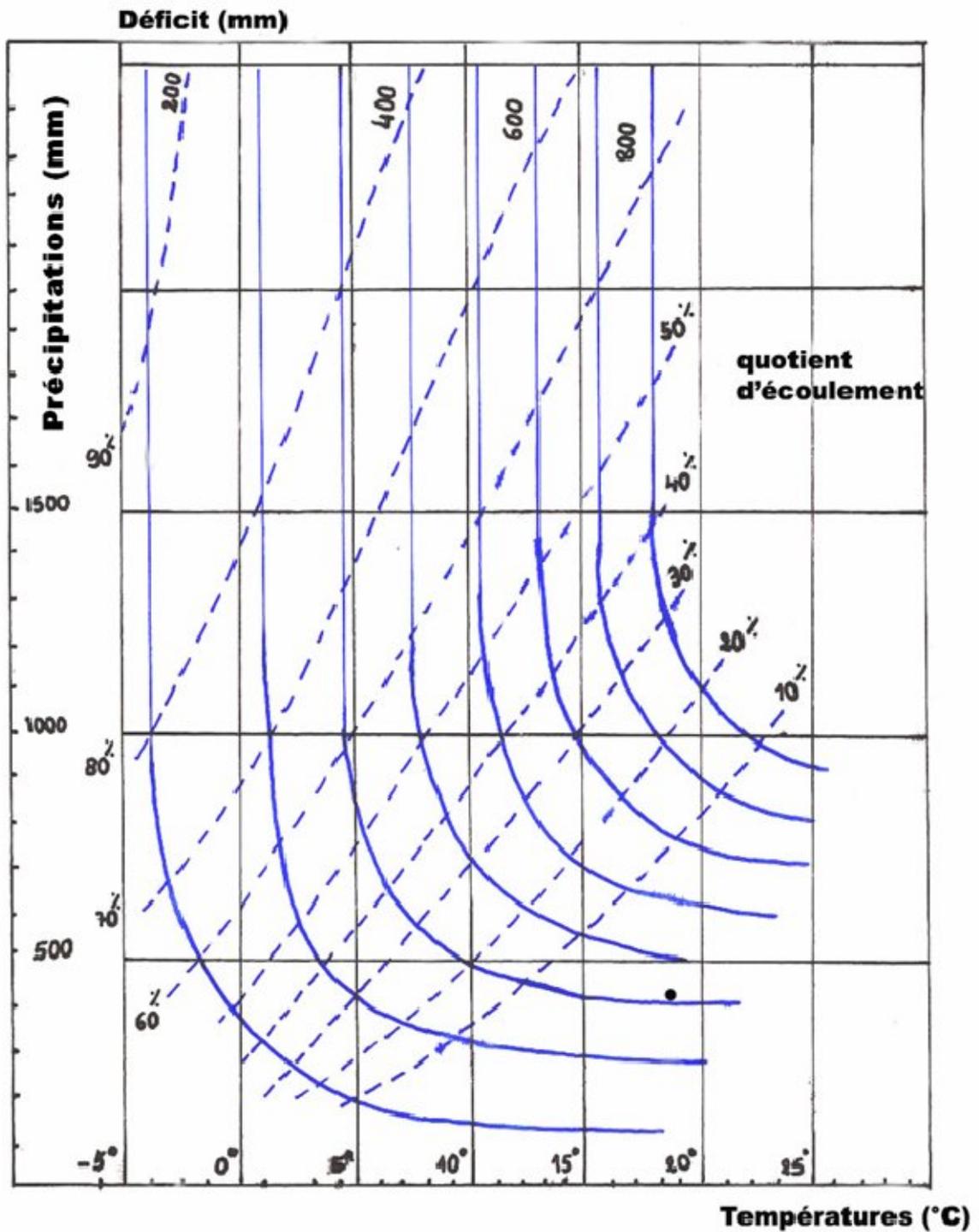
Les eaux superficielles sont sujettes à des déversements de rejets d'origine industrielle, La cartographie est le moyen le plus commode et aussi la meilleure illustration pour expliquer et représenter les conditions hydrogéologiques qui exposent ou au contraire Protègent plus ou moins les eaux souterraines vis-à-vis des pollutions d'origine superficielle.

Pour bien présenter la qualité chimique des eaux, les cartes obtenues par le logiciel Surfer ont été intégrées dans un système d'information géographique (SIG) en utilisant le logiciel MapInfo (6.5).

• BIBLIOGRAPHIE

- Bennie & Partners., 1983 : Schéma d'aménagement des ressources en eau dans la région d'Alger – Sebou.
- Agence nationale des ressources Hydraulique A.N.R.H BLIDA.
- Mme : Bahbouh.L ; prof ENSH Cours irrigation (2010/2011).
- (gilbert castany. professeur d'hydrogéologie a l'université pirre et Marie curie paris VI).principe et méthodes Hydrogéologie.
- Djoudar, D et Hallal, D., 1993 : Approche du comportement hydrodynamique d'un système aquifère alluvial. Zone oued El Harrach / oued El Hamiz (Mitidja / Algérie). Mémoire d'ingénieur, IST/USTHB/Alger. (sig) . Thèse Ingéniorat, ENSH / BLIDA.
- Djoudar Hallal, D., 2003 : Vulnérabilité et protection des régions côtières. Application aux alluvions de la Mitidja Orientale. Thèse de magistère, IST/USTHB/Alger.
- TAFAT MOHAMED : Régionalisation des paramètres ioniques influençant la qualité des eaux du bassin versant de la mitidja est,et de la baie d'alger/(octobre :2009).
- FAO, 2003 : L'irrigation avec des eaux usées traitées, manuel d'utilisation.
- <http://www.inra.fr/>.
- <http://www.fao.org/>.
- HYDROLAB- Un logiciel pour l'étude hydrologique.
- MAP INFO : logiciel SIG.
- SURFER32 : logiciel de calcul des courbes piézométriques.
- DIAGRAMME :logicielle de calculs chimiques.
- CROPWAT : Un logiciel pour la planification et la gestion des systèmes d'irrigation.

Annexe N°1 : Abaque de Wundt modifié par Countagne



Annexe N°2 : Campagne hydro chimique de la nappe alluviale de la Mitidja
Est ,2010

LNA(x)	LNA(y)	Période	Ca	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Cl mg/l
524250	366750	HE	200	26	103	5	140
530070	362550	HE	209	56	333	7	443
550550	380450	HE	179	57	94	11	148
550350	381650	HE	180	81	143	3	300
534770	361500	HE	118	27	36	3	30
534900	367700	HE	169	29	88	3	97
552750	385600	HE	221	35	227	4	388
556440	382630	HE	190	43	199	3	358
558620	379920	HE	174	30	198	3	177
557900	384670	HE	203	54	245	7	369
550650	370750	HE	159	38	78	3	81
553650	374620	HE	151	73	117	4	136
547900	382900	HE	159	37	217	11	311
541650	363770	HE	192	28	112	3	156
539200	373150	HE	140	30	123	3	125
541270	363070	HE	187	52	86	2	126
557900	384670	BE	220	60	190	8	400
534770	361500	BE	100	36	25	1	45
533750	361100	BE	142	20	93	1	150
558620	379920	BE	200	36	131	1	190
556440	382630	BE	156	38	119	5	200
534900	367700	BE	136	41	64	1	103
549200	383070	BE	160	72	60	3	146
547900	382900	BE	160	65	180	9	276
539200	373150	BE	120	24	137	2	176
545950	368500	BE	240	53	114	1	260
550650	370750	BE	200	53	75	2	130
553650	374620	BE	168	70	75	2	183
541270	363070	BE	164	70	60	2	130

Annexe N°2 : Campagne hydrochimique de la nappe alluviale de la Mitidia
Est ,2010

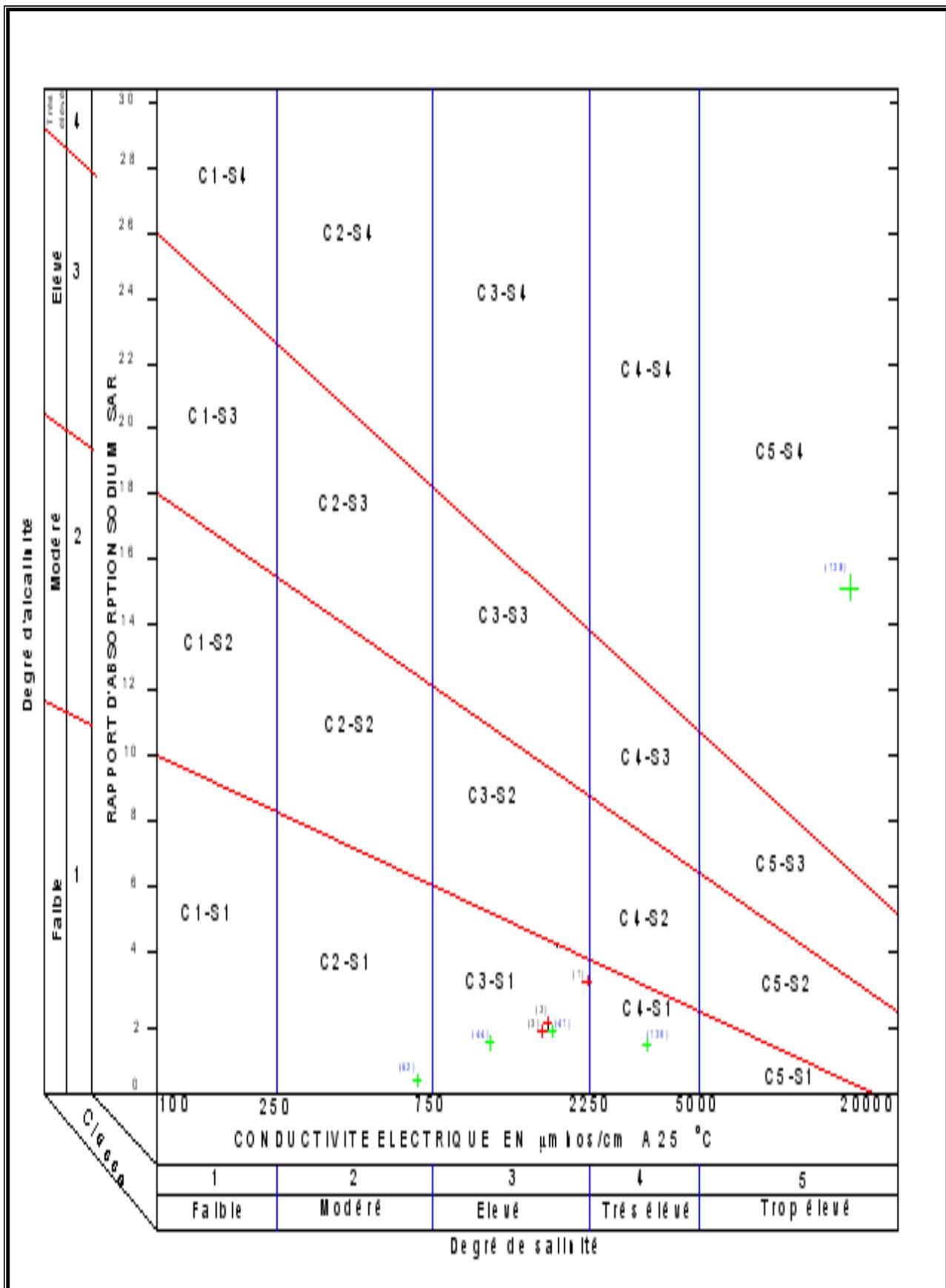
LNA(x)	LNA(y)	Période	SO4 mg/l	CO3H mg/l	CO3 mg/l	OH mg/l	NO3 mg/l
524250	366750	HE	112	468	0	0	76,0
530070	362550	HE	309	610	0	0	53,0
550550	380450	HE	200	558	0	0	8,0
550350	381650	HE	320	279	0	0	56,0
534770	361500	HE	139	339	0	0	22,0
534900	367700	HE	179	411	0	0	30,0
552750	385600	HE	194	421	0	0	80,0
556440	382630	HE	118	616	0	0	8,0
558620	379920	HE	356	469	0	0	39,0
557900	384670	HE	239	500	0	0	66,0
550650	370750	HE	223	515	0	0	33,0
553650	374620	HE	198	646	0	0	46,0
547900	382900	HE	123	669	0	0	29,0
541650	363770	HE	163	517	0	0	58,0
539200	373150	HE	144	442	0	0	14,0
541270	363070	HE	228	553	0	0	54,0
557900	384670	BE	200	576	0	0	95,0
534770	361500	BE	145	229	0	0	30,6
533750	361100	BE	178	293	0	0	5,2
558620	379920	BE	189	448	0	0	50,0
556440	382630	BE	158	354	0	0	45,7
534900	367700	BE	188	302	0	0	27,0
549200	383070	BE	274	397	0	0	60,0
547900	382900	BE	122	555	0	0	25,0
539200	373150	BE	187	275	0	0	23,0
545950	368500	BE	220	427	0	0	61,0
550650	370750	BE	234	430	0	0	33,0
553650	374620	BE	158	397	0	0	66,0
541270	363070	BE	232	433	0	0	54,0

LNA(x)	LNA(y)	Minéralisation mg/l	R.Sec mg/l	CE μ S/cm
524250	366750	1 054	1056	1 700
530070	362550	2 046	2031	3 300
550550	380450	1 178	1324	1 900
550350	381650	1 519	1590	2 450
534770	361500	620	657	1 000
534900	367700	930	958	1 500
552750	385600	1 538	1754	2 480
556440	382630	1 488	1548	2 400
558620	379920	1 426	1489	2 300
557900	384670	1 736	1602	2 800
550650	370750	992	1031	1 600
553650	374620	1 240	1114	2 000
547900	382900	1 488	1596	2 400
541650	363770	1 040	1124	1 677
539200	373150	930	913	1 500
541270	363070	1 178	1138	1 900
557900	384670	1 798	1984	2 900
534770	361500	505	499	814
533750	361100	818	876	1 320
558620	379920	1 240	1324	2 000
556440	382630	993	1005	1 602
534900	367700	868	826	1 400
549200	383070	1 178	1414	1 900
547900	382900	1 187	1288	1 914
539200	373150	826	970	1 333
545950	368500	1 240	1258	2 000
550650	370750	1 147	1083	1 850
553650	374620	1 040	1287	1 678
541270	363070	1 116	1197	1 800

Annexe N°3 : Suit Campagne hydro chimique de la nappe alluviale de la Mitidja
Est 2010.

Point d'eau	Période	LNA(x)	LNA(y)	CE μS/cm	pH	SAR
W041-1760	HE	524250	366750	1 700	7,4	9,69
W041-1763	HE	530070	362550	3 300	7,7	28,93
W021-04212	HE	550550	380450	1 900	7,2	8,65
W021-891	HE	550350	381650	2 450	7,7	12,52
W042-1000	HE	534770	361500	1 000	7,9	4,23
W042-1010	HE	534900	367700	1 500	7,5	8,84
W021-5	HE	552750	385600	2 480	7,7	20,06
W021-192	HE	556440	382630	2 400	7,8	18,44
W021-417	HE	558620	379920	2 300	7,5	19,6
W021-894	HE	557900	384670	2 800	8,1	21,61
W042-450	HE	550650	370750	1 600	7,7	7,86
W042-688	HE	553650	374620	2 000	8,1	11,06
W021-893	HE	547900	382900	2 400	8,0	21,92
W042-385	HE	541650	363770	1 677	7,5	10,68
W042-997	HE	539200	373150	1 500	8,2	13,34
W042-1003	HE	541270	363070	1 900	7,6	7,87
W021-894	BE	557900	384670	2 900	7,9	16,06
W042-1000	BE	534770	361500	814	7,9	3,03
W042-999	BE	533750	361100	1 320	8,2	10,32
W021-417	BE	558620	379920	2 000	7,9	12,06
W021-192	BE	556440	382630	1 602	7,8	12,07
W042-1010	BE	534900	367700	1 400	7,8	6,81
W021-890	BE	549200	383070	1 900	8,2	5,57
W021-893	BE	547900	382900	1 914	7,4	16,99
W042-997	BE	539200	373150	1 333	7,8	16,15
W042-439	BE	545950	368500	2 000	7,7	9,43
W042-450	BE	550650	370750	1 850	7,8	6,67
W042-688	BE	553650	374620	1 678	8,2	6,88
W042-1003	BE	541270	363070	1 800	8,3	5,55

Annexe N°4 : Diagramme de la classification de l'eau d'irrigation (Hand book 60).



Annexe N°5 : Tables ou système de cotation DRASTIC et PRAST

Recharge annuelle		Côte
Intervalle	(cm)	
0 - 5		1
5 - 10		3
10 - 18		6
18 - 25		8
> 25		9

Milieu aquifère		
Nature	Cote	Côte type
Schistes massifs	1 - 3	2
Roches métamorphiques	2 - 5	3
Roches métamorphiques altérées	3 - 5	4
Schistes en séquence	5 - 9	6
Grès massif	4 - 9	6
Calcaire massif	4 - 9	6
Sable et gravier	6 - 9	8
Basalte	2 - 10	9
Calcaire karstique	9 - 10	10

Type de sol		Cote type
Nature		
Peu épais ou absent		10
Gravier		10
sable		9
Argile fissurée		7
Limon sableux		6
Limon		5
Limon silteux		4
Limon argileux		3
Argile non fissurée		1

Topographie		Côte
Intervalle (%)		
0 - 2		10
2 - 6		9
6 - 12		6
12 - 18		3
> 18		

Impact de la zone non saturée		
Nature	Côte	Côte typique
Limon et argile	1 - 2	1
Argile schisteuse	2 - 5	3
Calcaire	2 - 7	6
Grès	4 - 8	6
Calcaire lite, grès et argile schisteuse	4 - 8	6
Sable et gravier avec silt et argile	4 - 8	6
Roche métamorphique / ignée	2 - 8	4
sable et gravier	6 - 9	8
Basalte	2 - 10	9
Calcaire karstique	8 - 10	10

Perméabilité	Côte
$4.7.10^{-7}$ - $4.7.10^{-6}$ m/s	1
$4.7.10^{-6}$ - $14.7.10^{-6}$	2
$14.7.10^{-6}$ - $32.9.10^{-6}$	4
$32.9.10^{-6}$ - $4.7.10^{-4}$	6
$4.7.10^{-4}$ - $9.4.10^{-4}$	8
$>9.4.10^{-4}$	10

P R A S T	
Paramètres	Poids
Pouvoir épurateur vertical du sous sol	8
Recharge annuelle	4
Milieu aquifère	3
Type de sol	2
Topographie	1

Pouvoir épurateur vertical du sous sol (sans unités)	Côte
< 1	6
1 - 2	5
2 - 3	2
> 3	1

Annexe N°6 : Campagne piézométrique de la nappe alluviale de la Mitidja est Avril 2010 - Octobre 2010

		Nature	coordonnees					
N° BIRH	N° Catalogue	du Point	X	Y	Z / rr (m)	avr-10	oct-10	
W041/PZ 50	E007-17433	PZ	529,867	360,486	86,726	68,50		
W041/PZ 49	E007-17432	PZ	530,575	360,502	89,976	68,70		
W042/PZ 51	E007-17435	PZ	531,635	361,399	87,701	53,93		
W041-PZ7 Tabbainet		pz	532,375	359,550	99,490	40,20		
W042-999	E007-9643	forage	533,750	361,100	95,780		76,20	
W042/PZ9 Baraki	E007-9126	PZ	533,800	371,750	79,247	44,56		
W042-1000	E007-9644	forage	534,770	361,500	106,530	42,65	47,40	
W042-1010	E007-9651	forage	534,900	367,700	45,910	44,70	60,15	
W042/PZ10 Sidi moussa	E007-9127	PZ	534,900	369,250	45,244	50,95	56,75	
W042-f4 Oed Adda		forage	538,460	373,920	27,000	22,04	22,96	
W042-997	E007-9641	forage	539,200	373,150	30,700	43,95	51,11	
W042/PZ4 Eucalyptus	E007-9681	PZ	540,600	369,850	51,199	52,03	57,35	
W042-1003	E007-9647	forage	541,270	363,070	103,460	17,20	29,30	
W021/PZ32 BA	E007-9141	PZ	543,550	382,250	27,010	24,00		

W021/PZ A BA	E007-9153	PZ	544,200	381,850	19,240	25,51	
W021/PZ36 BA	E007-9142	PZ	544,500	380,500	18,070	27,30	
W021/PZ38BA	E007-9143	PZ	544,750	382,350	19,650	18,30	
W021/PZ39 BA	E007-9144	PZ	544,900	381,850	17,670	28,64	
W021/PZ41 BA	E007-9145	PZ	545,375	382,750	19,380	21,55	24,13
W021/PZ42 BA	E007-9146	PZ	545,900	382,000	23,670	22,85	
W042-439	E007-9637	puits	545,950	368,500	65,030	5,00	11,60
W021/PZ E BA	E008-4579	PZ	546,125	381,450	16,770	25,90	
W021/PZ62 BA	E007-9152	PZ	546,150	383,250	15,100	24,60	
W021/PZ45 BA	E007-9147	PZ	546,850	382,600	17,820	27,85	28,01
W021/PZ48 BA	E007-9148	PZ	546,900	383,350	14,200	25,22	
W021/PZ D BA	E007-9154	PZ	547,000	382,000	15,490	27,10	
W021/PZ50 BA	E007-9149	PZ	547,400	382,800	16,010	21,10	25,33
W021/PZ61 BA	E007-9151	PZ	547,650	383,750	14,280	19,78	
W021/PZ51 BA	E007-9150	PZ	547,800	382,250	17,380	27,50	
W021-893	E008-4595	forage	547,900	382,900	14,040	23,90	
W021/PZ60 BA	E008-4576	PZ	548,150	383,750	15,110	22,50	

W021/PZ59 BA	E008-4575	PZ	548,300	384,650	13,730	19,15	
W021/PZ G BA	E008-4581	PZ	548,450	383,300	16,430	23,90	23,76
W021/PZ C BA	E008-4578	PZ	548,500	382,550	18,340	18,40	
W021/PZ54 BA	E008-4573	PZ	548,850	385,050	10,690	15,25	
W021/PZ F BA	E008-4580	PZ	549,200	384,250	15,070	22,60	
W021-4211 /PZ 2 HZ	E008-4212	PZ	549,300	380,750	27,347	39,15	39,83
W021/PZ B BA	E008-4577	PZ	549,350	383,600	16,380	27,15	
W021/PZ58 BA	E008-4574	PZ	549,450	386,050	13,720	10,85	
W021-891	E008-4594	forage	550,350	381,650	18,030	24,40	
W021-4212 /PZ 1 HZ	E008-4211	PZ	550,550	380,450	25,705	40,25	41,15
W042-450	E007-4598	puits	550,650	370,750	78,480	5,80	4,06
W021-5	E008-4583	puits	552,750	385,600	25,470	4,95	5,60
W042-688	E007-4600	puits	553,650	374,620	48,880	8,50	9,26
W021-193	E008-4587	puits	555,700	382,600	17,653	10,80	10,95
W021-892	E007-9595	puits	556,500	384,350	10,040	18,30	19,06
W021-894	E008-4596	puits	557,900	384,670	2,320	10,75	10,60
W021-417	E008-4590	puits	558,620	379,920	37,030	10,43	10,70

**Ajustement
à une loi de
Gumbel**

(mode=28,02
gradex=15,99
taille=35 et
I.C. à 95%)

Taille n= 35

Xo= 28,02

g= 15,99

I.C. à (en%)= 95

U

Gauss=

1,9604

Valeurs de départ	Valeurs classées	Ordre de classement	Fréquence expérimentale	Variable réduite	Valeur expérimentale	Valeur théorique	Borne inférieure	Borne supérieure
7,2	7,2	1	0,014	-1,447	7,2	4,888858	-8,923	12,71779
13,44	13,44	2	0,043	-1,147	13,44	9,672391	-2,0383	16,716
14,4	14,4	3	0,071	-0,970	14,4	12,50132	1,95072	19,16302
17,04	17,04	4	0,100	-0,834	17,04	14,68188	4,96952	21,10516
19,92	19,92	5	0,129	-0,718	19,92	16,52964	7,48093	22,79753
22,08	22,08	6	0,157	-0,616	22,08	18,17557	9,67575	24,34733
23,04	23,04	7	0,186	-0,521	23,04	19,68814	11,6527	25,81157
23,04	23,04	8	0,214	-0,432	23,04	21,10834	13,4701	27,22526
23,04	23,04	9	0,243	-0,347	23,04	22,46319	15,1656	28,61214
24	24	10	0,271	-0,265	24	23,77177	16,7652	29,98965
24,48	24,48	11	0,300	-0,186	24,48	25,04844	18,288	31,37137
25,44	25,44	12	0,329	-0,107	25,44	26,30455	19,7486	32,76849
25,68	25,68	13	0,357	-0,029	25,68	27,54953	21,1589	34,19061
26,88	26,88	14	0,386	0,048	26,88	28,79159	22,5289	35,6464
30	30	15	0,414	0,126	30	30,0382	23,8675	37,14393
31,92	31,92	16	0,443	0,205	31,92	31,29643	25,1829	38,69114
32,4	32,4	17	0,471	0,285	32,4	32,57328	26,4829	40,29605
34,08	34,08	18	0,500	0,367	34,08	33,87592	27,7754	41,96718
34,8	34,8	19	0,529	0,450	34,8	35,21197	29,0683	43,71385
37,44	37,44	20	0,557	0,536	37,44	36,58975	30,3701	45,54665
38,4	38,4	21	0,586	0,626	38,4	38,01866	31,6897	47,47788
38,4	38,4	22	0,614	0,719	38,4	39,50957	33,0373	49,52224
38,4	38,4	23	0,643	0,817	38,4	41,07539	34,4243	51,69763
39,6	39,6	24	0,671	0,920	39,6	42,73182	35,864	54,02637
40,08	40,08	25	0,700	1,031	40,08	44,49848	37,3729	56,53682
40,8	40,8	26	0,729	1,150	40,8	46,40048	38,971	59,26586
45,84	45,84	27	0,757	1,279	45,84	48,471	40,6847	62,26277
48,24	48,24	28	0,786	1,422	48,24	50,75538	42,5492	65,59542
51,12	51,12	29	0,814	1,583	51,12	53,31815	44,6141	69,36104
55,92	55,92	30	0,843	1,766	55,92	56,25601	46,953	73,70596
57,12	57,12	31	0,871	1,983	57,12	59,72392	49,6834	78,86535
58,32	58,32	32	0,900	2,250	58,32	63,99455	53,0109	85,25388
64,8	64,8	33	0,929	2,602	64,8	69,62008	57,3507	93,71251
89,28	89,28	34	0,957	3,128	89,28	78,02692	63,7735	106,4159
106,8	106,8	35	0,986	4,241	106,8	95,82527	77,229	133,453

Fréquence	U.Gumbel	Val.théo.	Borne inf.	Borne sup.	Valeur	Fréq. théo.	Pér. Ret.
0,2	-0,476	20,408	12,579	26,523	20,408	0,20	1,25
0,1	-0,834	14,682	4,970	21,105	14,682	0,10	1,11
0,5	0,367	33,876	27,775	41,967	33,876	0,50	2,00