

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار-عنابة

Faculté des sciences de la Terre
Département de Géologie

Année 2006

Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat es-sciences

**VULNERABILITE ET RISQUES DE POLLUTION
DES EAUX SOUTERRAINES DE LA NAPPE DES
SABLES MIOCENES DE LA PLAINE
D'EL MA EL ABIOD
Nord-Est ALGERIEN**

Option
Hydrogéologie

Par
ROUABHIA Abdelkader

(Ingénieur d'Etat en Hydrogéologie. Magister en Chimie analytique)

DIRECTEUR DE THESE : **KHERICI Nacer** Professeur, Université de Annaba

DEVANT LE JURY

PRESIDENT	:	REMINI Boualem	Professeur, Université de Blida
		DJABRI Larbi	Professeur, Université de Annaba
EXAMINATEURS :	 	HSISSOU Youssef	Professeur, Univ. Ibn Zohr Maroc
		MEDDI Mohamed	Professeur, C. Univ. Khemis Meliana
		BOUMEZBEUR Abderrahman	M. de Conf, C. Univ. Tébessa

.

.

.

.

.

.

/

/

/

:

ABSTRACT

In Algeria, a new politic concerning a water management, recently comes to be established, it concern protecting and safeguarding the water resources in their deposits, before their contaminations, with only legislative tools which answer socio-economic and demographic constraints, and which do not take into account the nature of these tools and the facility of their application, by the managers.

The study suggested concern a semi arid area in Algeria, in the zone of the high plateau, where the aridity pushes back its limits towards north, causing the progressive desertification of its zones returning the field of underground water, more and more, vital and weak , requiring for his protection , tools allowing an efficacy in the control.

It has as an object, the vulnerability and the chemical risk of pollution, of the aquiferous system ,plain of El My El Abiod, which has a primarily agricultural vocation, and which knew, since ten years later , a important industrial development, with for consequences of the rejections abundant untreated in the physical environment (in particular water). Also, in the near future, it is to be feared as the quality of underground water is not any more to the standards of portability for the human drinking but also for much of other uses.

In this study we wants to locate on maps the vulnerable zones and those with high level risk as for the chemical pollution of a water contained in a sandy aquifer, and to make in parallel an inventory of the real or potential causes of pollution of natural or human origin.

In El My El Abiod catchment area, underground water is not any more under the conditions which guarantee their very good quality since few years later , considering the absence of a protection strategy which need necessary an urgent diagnostic .

The morphology, the geological structure and the climatic conditions facilitate the transfer of pollutants in the aquiferous system; these constraints led us to engage a discussion on the origin of the alimentation of the principal aquifer being in sands of Miocene, on the water circulation, the evolution of its chemistry, and on the influence of the anthropogenic activities.

In this way we tried to inventory the causes of potential or real pollution and to show the origin of underground water, their vulnerability and the chemical pollution risk with which they are confronted, considering several parameters such as the thicknesses of the layers constituting the ground and under ground, the depth of the water level of the aquifer, privileged flow directions and water chemistry characteristics.

Key words: Underground water, pollution, anthropic factor, vulnerability, Algeria.

RESUME

En Algérie, une nouvelle politique en matière de gestion des ressources hydriques, vient récemment de s'instaurer, elle vise à protéger et à sauvegarder les ressources en eaux dans leurs gisements, avant qu'elles ne soient contaminées, avec uniquement des outils législatifs qui répondent à des contraintes socio-économiques et démographique, et qui ne prennent pas en considération la nature de ces outils et la facilité de leur application, par les gestionnaires.

L'étude proposée a pour cadre une région semi aride de l'Algérie, dans la zone des haut plateaux, où l'aridité repousse ses limites vers le Nord, provoquant ainsi la désertification progressive de ses zones rendant le domaine de l'eau souterraine, de plus en plus, vital et fragile, nécessitant pour ça préservation des moyens permettant une efficacité dans le control et la maîtrise.

Elle a pour objet, la mise en évidence de la vulnérabilité et le risque de pollution chimique, du système aquifère de la plaine d'El Ma El Abiod, qui a une vocation essentiellement agricole, et qui a connu, il y'a une dizaines d'années, un développement industriel important, avec pour conséquences des rejets abondant non traités dans le milieu physique (en particulier l'eau). Aussi, dans un avenir proche, il est à craindre que la qualité des eaux souterraines ne soit plus aux normes de potabilité pour l'alimentation humaine mais également pour beaucoup d'autres utilisations.

Dans cette étude on veut localiser sur des cartes les zones vulnérables et celles à niveau de risque élevé quant à la pollution chimique d'une eau contenue dans un réservoir sableux, et faire en parallèle un inventaire des causes de pollution réelle ou potentielle d'origine naturelle ou anthropique.

Dans le sous bassin versant d'El Ma El Abiod, les eaux souterraines ne sont plus sous les conditions, qui dans le temps garantissent leur très bonne qualité, vu l'absence d'une stratégie de protection ce qui rend urgent un premier diagnostique.

La morphologie, la structure géologique et les conditions climatiques favorisent et facilitent le transfert de polluants dans le système aquifère, ces contraintes nous ont conduit à engager une discussion sur l'origine de l'alimentation de l'aquifère principale se trouvant dans les sables du miocènes, sur la circulation de l'eau, sur l'évolution de son chimisme, et sur l'influence des activités anthropiques.

Ainsi, les méthodes adoptées pour la cartographie de la vulnérabilité et du risque de pollution, ont permis de distinguer trois zones de degré de vulnérabilité différent. Les zones de faible et moyenne vulnérabilité occupent respectivement 30 et 45% de la surface totale de la plaine, alors que les zones à forte vulnérabilité occupent 25% de la dite surface

Mots clés; El Ma El Aiod, Pollution des eaux souterrains, vulnérabilité, cartographie, risque

REMERCIEMENTS

Le présent travail s'insère dans le cadre d'une étude pluridisciplinaire sur la pollution, la qualité des eaux souterraines et les facteurs qui les conditionnent. Il a été réalisé sous la direction du **Professeur Nacer KHERICI**, de la faculté des sciences de la terre, de l'université de Annaba

Au terme de ce travail, je souhaite exprimer ma gratitude et mes remerciements à tous les intervenants et toutes les personnes universitaires, professionnelles ou autres qui, de près ou de loin, ont contribué à sa réalisation, en particulier :

Monsieur le **Professeur Nacer KHERICI** de la faculté des sciences de la terre de l'Université d'Annaba, pour la confiance dont il m'a gratifiée en acceptant d'encadrer les travaux de cette thèse en se préoccupant constamment de son avancement. Je le remercie vivement d'avoir toujours été là. Il n'a jamais épargné un effort, à me faire profiter de son expérience. Ses encouragements ont été nécessaires au bon déroulement de mes travaux de recherche et ce malgré la distance. Je ne serais lui exprimer ma gratitude et ma reconnaissance à une juste mesure.

A ceux qui ont participé à ma formation et accepté de diriger ou de juger ce travail.

Monsieur le **Professeur Larbi DJABRI**, de la faculté des sciences de la terre de l'Université d'Annaba, qui m'a initié à la recherche scientifique en m'intégrant dans son équipe de recherche, en Algérie et à l'étranger (CRSTRA, accord programme MDU77), cette fois-ci de m'avoir fait honneur d'examiner ce travail et accepter de siéger à ce jury. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

Monsieur le **Professeur Boualem REMINI**, de l'Université Saad Dahleb de BLIDA, qui a bien voulu me faire l'honneur de présider le jury, je le remercie pour sa disponibilité et qu'il trouve ici toute ma gratitude.

Monsieur le **Professeur Mohamed MEDDI** de l'Université de Khemis Meliana, d'avoir accepté de juger ce travail et de participer au jury, qu'il me soit ainsi permis de le remercier sincèrement.

Monsieur le **Professeur Youssef HSISSOU**, de l'Université Inb Zohr au MAROC, ses travaux sur la pollution des eaux souterraines ont été pour moi d'un grand apport. Pour l'intérêt qu'il porte à ce travail et l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de juger cette thèse.

Monsieur le **Docteur Abderrahmane BOUMAZBEUR**, Maître de conférences au centre Universitaire de Tébessa, qui m'a fait le plaisir de participer au jury et l'intérêt qu'il a accordé à ce travail.

Messieurs les **professeurs Jacky MANIA**, de l'Ecole Universitaire Des Ingénieurs de Lille, **Gérard VERGOTEN**, et **Baghdad OUADDAN** de l'Institut de Chimie de l'Université de LILLE (France) pour m'avoir accueilli dans leur laboratoire et permis d'effectuer des analyses géochimiques. Cette thèse leur doit beaucoup à travers les discussions fructueuses que j'ai eues avec eux.

Monsieur le **Professeur Lhoucine BOUCHAOU**, de l'Université Inb Zohr au MAROC, pour les corrections et les orientations lors de mon stage à Lille, et la rédaction de mon deuxième article.

Madame et Monsieur le **Docteur DJERAB Abderrazak**, Maître de conférences, pour la lourde tâche, celle de la correction de la géologie et l'orthographe.

Je ne saurais être juste sans adresser mes remerciements les plus vifs et les plus amicaux à mon frère, ami et collègue : le **Doctorant BAALI Fethi** Maître assistant au centre universitaire de Tébessa.

A Monsieur le Professeur MESSADI Djeloul ainsi que Madame et Messieurs ; Azzdine HANI, Rabah LAOUAR, H. KHERICI, Hichem CHAFAI, Maîtres de conférences à l'Université de Annaba, le Docteur ROUABHIA Samir, Maître assistant hospitalo-universitaire au CHU de Batna, pour leurs critiques, conseils et aides.

A FEHDI Chemseddine, GOUAIDIA Layachi, DEFAFLIA Nabile, BENHAMADI Kamel, AOUN Mounira, ZEDAM Rabah, GEUFAIFIA Omar, mes collègues au Centre Universitaire de Tébessa. Mourad CHAWKI de l'Université de Ouargla, SOUISSI Lotfi et TOUHAMI I. de l'Université de Annaba.

A mes étudiants, actuellement Ingénieurs (es) : HAMED Amor, BRAHMIA Karima, BOUTERRA Moufida, SAIGUI Mustapha, de m'avoir accompagner sur terrain et aider au laboratoire.

Enfin, je ne saurais oublier tous ceux dont la contribution, si elle ne concerne pas la recherche, n'en fut pas moins précieuse.

ROUABHIA Abdelkader





*A ceux que je ne pourrais jamais
Remercier assez :*

*Mes Parents
Mes frères et sœurs
Ma femme
A mes amis
.... Ce travail, est pour vous*

ROUABHIA Abdelkader

زید القادر

Table Des Matières

	INTRODUCTION GENERALE	01
1	<i>CADRE GEOGRAPHIQUE ET MILIEU NATUREL</i>	
A	Objectifs de l'étude.....	03
B	Cadre géographique et milieu naturel.....	04
1.	Introduction.....	04
2.	Topographie.....	05
3.	Couvert végétal	05
4.	Economie de la région.....	07
5	Hydrographie.....	07
6	Géomorphologie.....	07
2.	<i>APERÇU GEOLOGIQUE</i>	
1.	Introduction	09
2.	Stratigraphie Lithologie.....	09
2.1.	Trias	09
2.2	Crétacé.....	10
2.2.1	Aptien moyen et inférieur.....	10
2.2.2	Aptien supérieur.....	10
2.2.3	Albien inférieur.....	10
2.2.4	Albien supérieur.....	11
2.2.5	Cénomaniens.....	09
2.2.6	Turonien.....	12
2.2.7	Campanien inférieur- Emscherien	14
2.2.8	Campanien supérieur – maestrichtien	14
2.3	TERTIAIRE.....	14
2.3.1	Miocène.....	14
2.4	Quaternaire	16
2.4.1	Conglomérats	16
2.4.2	Croûte calcaire.....	16
2.4.3	Dépôts de sources	16
2.4.4	Nappe des cailloux.....	16
2.4.5	Dépôts actuels.....	17
3	Tectonique.....	17
4	Styles tectoniques.....	17
5	Paléogéographie.....	19
6	Conclusion	20
3.	<i>HYDROCLIMATOLOGIE</i>	
1	Introduction.....	21
2	Les précipitations.....	21
2.1	Equipement de la région.....	21
2.2	Précipitations annuelles.....	22
2.3	Détermination de la lame d'eau précipitée.....	22
2.3.1	Moyenne arithmétique des stations.....	22
2.3.2	Méthode de THIESSEN.....	20
2.3.3	Méthode des isohyètes.....	23
2.4	Discussion des résultats.....	23
3	Coefficient pluviométrique relatif : (H)	24
4	Précipitations mensuelles.....	24

2.2.1	Description.....	65
2.2.2	Géométrie des horizons des grès.....	65
2.2.3	Epaisseur des niveaux miocènes.....	57
2.2.4	Les calcaires de la plaine d'El Ma El Abiod.....	57
3	Conditions aux limites du système aquifère.....	59
4	Etude des paramètres hydrodynamiques.....	61
4.1	La nappe alluviale.....	61
4.2	La nappe miocène.....	61
4.3	Répartition des paramètres hydrodynamiques.....	61
4.3.1	Carte des transmissivités.....	62
4.3.2	Carte des perméabilités.....	63
4.3.3	Les essais par pompage.....	63
5	Piézométrie.....	70
5.1	Inventaire des points d'eau.....	70
5.2	Evolution de la Piézométrie.....	70
5.2.1	Carte Piézométrique : mars 2001.....	70
5.2.2	Carte Piézométrique : octobre 2002.....	71
5.2.3	Carte Piézométrique : septembre 2003.....	72
5.2.4	Carte Piézométrique : mars 2003.....	72
5.2.5	Carte Piézométrique : mars 2004.....	73
6	Synthèse des états piézométriques	74
7	Bilan du système aquifère.....	76
8	L'INFILTRATION SUR LE BASSIN D'EL MA EL ABIOD.....	77
8.1	Propriétés physiques des sols d'El Ma El Abiod.....	77
8.2	L'infiltration.....	77
8.2.1	Définition et paramètres descriptifs de l'infiltration.....	77
8.2.2	Facteurs ayant une influence sur la mesure.....	79
8.3	Mesure de l'infiltration.....	80
8.4	Cartographie de l'infiltration.....	82
9	RETOURE D'EAU D'IRRIGATION.....	83
9.1	Enquête statistique.....	83
9.2	Inventaire des points recensés.....	83
9.3	Puits abandonnés.....	83
9.4	Prélèvements.....	85
9.5	Estimation du retour d'eau d'irrigation	86

**5. HYDROCHIMIE ET QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES DU SYSTEME
 AQUIFERE DE LA PLAINE D'EL MA EL ABIOD**

1	Introduction.....	88
2	Les eaux de sources.....	89
3	Les eaux de surface.....	90
4	Les eaux souterraines.....	90
4.1	Détermination des faciès hydrochimiques.....	90
4.2	Représentation graphique et identification des faciès.....	90
4.2.1	Diagramme de Scholler-Berkalof.....	91
4.2.2	Diagramme de Piper.....	93
5	Cartographie hydrochimique.....	96
5.1	Les chlorures.....	96
5.2	Les sulfates.....	99
6	Origine du chimisme des eaux du système aquifère.....	101

7	Détermination des apports.....	101
7.1	les apports anthropiques.....	101
7.2	Les rejets (eaux usées, poussières).....	101
7.3	Les apports naturels.....	103
7.4	Cartographie de la conductivité.....	103
8	Quelques éléments de géochimie.....	103
8.1	Le strontium.....	103
8.1.1	Cartographie du strontium.....	104
8.1.2	Evolution du strontium.....	104
8.2	Les Nitrates.....	105
8.2.1	Le cycle de l'azote à l'échelle de la parcelle.....	105
8.2.2	Cartographie de la répartition des nitrates.....	106
9	LES METAUX LOURDS (zinc et plomb).....	109
9.1	Examen de la pollution par le zinc et le plomb.....	109
9.2	Elément en faveur de la pollution liée au trafic routier.....	110
9.2.1	Géologie et profondeur du plan d'eau.....	110
9.2.2	Les conditions climatiques.....	110
9.2.3	L'infiltration.....	110
9.3	Examen de la pollution par le trafic routier sur la RN16.....	111
9.3.1	Inventaire des points d'observation.....	112
9.3.2	Cartographie de la répartition du plomb.....	114
9.3.4	Cartographie de la répartition du zinc.....	115
9.3.5	Corrélation entre les deux éléments.....	116
9.3.6	Evolution spatiale des deux éléments.....	116
9.5	ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES.....	117
9.5.1	Choix de la méthode.....	117
9.5.2	Principe de la méthode.....	117
9.5.3	L'espace des variables.....	117
9.5.4	L'espace des unités statistiques.....	118
9.6	Application.....	118
9.6.1	Campagnes de l'année 2000.....	118
9.6.2	Campagne de l'année 2003.....	120
9.6.3	L'ensemble des campagnes. ACP globale.....	122
9.7	Conclusion.....	124
10	Aptitude à l'irrigation des eaux de la plaine d'El Ma El Abiod.....	124
10.1	Introduction.....	125
10.2	Risque de sodicité et de salinité.....	125
10.3	Calcul des paramètres des eaux à usage agricole.....	125
10.4	Interprétation des résultats.....	127
10.5	Interprétation des résultats des diagrammes	131
10.6	Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation selon le diagramme de Richards.....	131
10.7	Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation selon le diagramme de Wilcox.....	131

**6. VULNERABILITE A LA POLLUTION CHIMIQUE DES EAUX
SOUTERRAINES DU SYSTEME AQUIFERE DE LA PLAINE
D'EL MA EL ABIOD**

1	introduction.....	134
2	La vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines.....	134
3	Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité.....	135
4	Vulnérabilité du système aquifère d'El Ma El Abiod.....	138

4.1	Vulnérabilité du système selon la méthode DRASTIC.....	138
4.1.1	Conditions d'utilisation de la méthode DRASTIC	140
4.2	Construction de la carte de vulnérabilité	140
4.2.1	Profondeur de la nappe	140
4.2.2	La recharge efficace.....	141
4.2.3	Nature de la zone saturée.....	141
4.2.4	La nature du sol.....	142
4.2.5	La topographie, la pente.....	143
4.2.6	Nature de la zone non saturée (vadose).....	144
4.2.7	La perméabilité.....	144
4.2.8	La carte de la vulnérabilité.....	145
5	La vulnérabilité selon la méthode BRGM.....	146
5.1	Les étapes.....	146
6	Calcul des indices de contamination.....	148
6.1	Discussion des résultats	150
7	Conclusion.....	151
7.	<i>RISQUE DE POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES DE LA PLAINE D'EL MA EL ABIOD</i>	
	Introduction.....	152
1	La notion du risque de pollution.....	152
2	Indicateurs de pollution.....	153
2.1	Définition.....	153
2.2	Application.....	154
3	Carte des risque de pollution.....	156
5	Conclusion.....	157
8.	<i>CONCLUSIONS GENERALES</i>	158
9.	<i>BIBLIOGRAPHIE</i>	161
10.	<i>ANNEXES</i>	167

Liste des Figures

01	Situation géographique de la plaine d'El Ma el Abiod.....	05
02	Représentation en trois dimensions de la plaine d'El Ma El Abiod.....	06
03	Carte géologique.....	12
04	Coupe géologique	14
05	Carte du système de faille (UGF-BRNO 1971).....	18
06	Variation des moyennes mensuelles annuelles des précipitations.....	25
07	Distribution annuelle des précipitations aux stations d'observation (1984-2004).....	26
08	Distribution interannuelle des précipitations mensuelles aux stations d'observation (1984-2004).....	27
09	Corrélation entre les températures calculées par les deux modèles.....	30
10	Température moyenne mensuelle aux stations d'observation	31
11	Abaque de l'indice d'aridité annuelle de De Martone 1923.....	33
12	Climogramme de Peguy.....	34
13	Diagramme Pluviothermique aux stations d'observation 1984-2004.....	36
14	Diagramme ombrothermique aux stations d'observation 1984-2004.....	37
15	Directions prédominantes des vents.....	42
16	Coupe géologiques schématiques sur oued el ma lassouad et E'znad	43
16.1	Photographie de l'oued el Goussa à el Goussa Rouabhia 2005.....	43
16.2	Vue satellitaire de la plaine d'El Ma El Abiod. Septembre2005.....	45
17	Carte de position des sondages électriques.....	46
18	Coupe géoélectrique transversales I	47
18.1	Coupe géoélectrique transversales II	48
18.2	Coupe géoélectrique transversales III.....	49
18.3	Coupe géoélectrique transversales IV.....	49
18.4	Coupe géoélectrique transversales V.....	50
18.5	Carte d'égale épaisseur des sables.....	51
18.6	Carte d'égale épaisseur des grès.....	52
18.7	Carte d'égale épaisseur des argiles sableuses.....	52
18.8	Représentation en 3D des horizons aquifères.....	53
19	Coupes hydrogéologiques à travers la plaine d'El Ma El Abiod.....	58
19.1	Structure géologique et hydrogéologique du système aquifère d'El Ma El Abiod.....	59
19.2	Carrière de sable abandonnée à T'noukla. Rouabhia 2005.....	59
20	Carte des conditions aux limites du système aquifère d'El Ma El Abiod.....	60
21	Carte des transmissivités.....	62
22	Carte des perméabilités	63
23	Représentation graphique des essais par pompage.....	65- 69
24	Carte Piézométrique. mars 2001.....	70
25	Carte Piézométrique. octobre 2002.....	71
26	Carte Piézométrique. septembre 2003.....	72
27	Carte Piézométrique. mars 2003.....	73
28	Carte Piézométrique. mars 2004.....	73
29	Variation de la cote Piézométrique dans le temps et dans l'espace.....	75
30	Composantes du bilan hydrogéologique dans le bassin versant d'El Ma El Abiod.....	76
31	Evolution du régime d'infiltration et de l'infiltration cumulative au cours du temps...	80
32	Schéma simplifier d'un annaux concentrique utilisé dans les essais d'infiltration.....	81
33	Carte de l'infiltration en cm/h. Rouabhia septembre 2003.....	82
34	Classification des puits recensés en pourcentage.....	83

35	Pourcentages des différentes causes d'abandon des puits.....	84
36	Sources naturelles et anthropiques de la salinité.....	87
37	Diagramme de scholler-berkallof. octobre 2000.....	91
37.1	Diagramme de scholler-berkallof. Juin 2002.....	92
37.2	Diagramme de scholler-berkallof. octobre 2003.....	92
38	Diagramme de Piper. (présentation générale).....	93
38.1	Diagramme de Piper. Octobre 2000.....	94
38.2	Diagramme de Piper. Juin 2002.....	95
38.3	Diagramme de Piper. Octobre 2003.....	96
39	Carte des chlorures. Octobre 2000.....	97
39.1	Carte des chlorures. Juin 2002.....	97
39.2	Carte des chlorures. Octobre 2003.....	98
39.3	Carte des chlorures. Mars 2004.....	98
40	Carte des sulfates. Octobre 2000.....	99
40.1	Carte des sulfates. Juin 2002.....	99
40.2	Carte des sulfates. Octobre 2003.....	100
40.3	Carte des sulfates. Mars 2004.....	100
41	Carte des conductivités. avril 2003.....	102
42	Carte du strontium juin 2002.....	103
43	Carte des concentration molaires du rapport Sr^{2+}/Ca^{2+}	104
44	Le cycle de l'azote dans le sol.	105
44.1	Carte des nitrates. Octobre 2000.....	107
45	Carte des nitrates. Juin 2002.....	107
45.1	Carte des nitrates. Octobre 2003.....	108
45.2	Carte des nitrates. Mars 2004.....	108
46	Mode de transfert des émissions polluantes vers le sol et les eaux souterraines.....	109
47	Risque de migration de polluants par infiltration des eaux a travers un sol poreux.....	111
48	Carte d'inventaire des points d'échantillonnage	113
49	Carte de répartition du plomb.....	114
50	Carte de répartition du Zinc.....	115
51	Corrélation entre le zinc et le plomb.....	116
51.1	Evolution dans l'espace du zinc et du plomb.....	116
52	Représentation graphique en ACP1 année 2000.....	119
52.1	Représentation graphique des individus année 2000.....	119
53	Représentation graphique en ACP1. année 2003.....	121
53.1	Représentation graphique des individus année 2003.....	121
54	Représentation graphique en ACP1. globale.....	123
54.1	Représentation graphique des individus ACP globale.....	123
	Carte d'aptitude des eaux a l'irrigation selon le diagramme de Richards Octobre 2000	131
	Carte d'aptitude des eaux a l'irrigation selon le diagramme de Wicox Octobre 2000...	131
55	Carte de la profondeur d'eau et ces indices	140
56	Carte de la recharge efficace et ces indices.....	141
57	Carte de la nature de la zone saturée et des indices correspondant.....	142
58	Carte de la pente et des indices correspondants.....	143
58.1	Carte de la nature du sol et indices correspondants.....	143
59	Carte de la zone non saturée et indices correspondants	144
60	Carte de la perméabilité et des indices correspondants.....	145
61	Carte des indices DRASTIC.....	145
62	Carte de vulnérabilité selon la méthode DRASTIC.....	146
63	Principe de la méthode BRGM pour l'établissement de la carte de vulnérabilité.....	147

63.1	Carte de vulnérabilité selon la méthode BRGM.....	148
64	Carte de vulnérabilité selon la méthode des indices de contaminations.....	150
70	La notion de risque potentiel.....	153
71	Carte des sources de pollution réelle où potentielle des eaux.....	154
72	Carte de l'indicateur pente.....	155
73	Carte de risque nitrates (moyenne des campagnes 2000-2004).....	155
74	Construction d'un indicateur de pollution.....	156
75	Carte de risque de pollution d'origine anthropique des eaux souterraines de la plaine d'El Ma El Abiod.....	157

Liste des Tableaux

01	Intérêt hydrogéologique et hydrochimique.....	20
02	Caractéristiques des stations pluviométriques.....	21
03	Précipitations moyennes annuelles (1984-2004).....	22
04	Coefficient pluviométrique aux stations d'observation (1984-2004).....	24
05	Précipitations moyennes mensuelles aux stations d'observation (1984-2004).....	25
06	Distribution interannuelle des précipitations mensuelles aux stations de mesures...	28
07	Résultats des calculs des températures par les deux méthodes.....	30
08	Températures moyennes mensuelles (1984-2004).....	32
09	Indice climatique de De martone.....	39
09.1	Résultats de calcul de l'E.T.P par Thonhwait.....	39
09.2	Résultats de calcul de l'E.T.P par Turc.....	39
10	Commentaire des résultats.....	39
11	Bilan hydrique à El Ma El Abiod.....	40
11.1	Bilan hydrique à El Khengua.....	40
11.2	Bilan hydrique à Ouled M'hamèd.....	40
11.3	Bilan hydrique à E'Zouiaria.....	41
12	Résultats de calcul de ruissellement	41
12.1	Débits enregistrés sur l'oued El Ma EL Abiod.....	45
13	Lithologie et résistivités des forages M4 et M5.....	47
14	Lithologie et résistivités des forages M6, M9 et M10.....	48
15	Lithologie et résistivités des forages M1, P23 et M6.....	49
16	Lithologie et résistivités des forages M12, M13, M2, M10 et M15.....	50
17	Epaisseur des forages.....	57
18	Quelques caractéristiques hydrodynamiques des forages.....	62
19	Quelques caractéristiques hydrodynamiques des puits.....	64
20	Résultats des essais d'infiltration sur le bassin d'El Ma El Abiod.....	80
21	Inventaires des puits recensés dans la région.....	83
22	Statistiques sur les différents types de puits abandonnés.....	84
23	Statistiques sur les pompages des eaux souterraines.....	85
24	Statistique sur les prélèvements d'eau pour l'irrigation.....	86
25	Les débits moyens prélevés pour l'irrigation et l'alimentation.....	86
26	Répartition et fréquence des prélèvements hydrochimiques	88
26.1	Analyses des eaux de sources.....	89
27	Evolution statistique des faciès.....	88
28	Résultat d'analyses du calcium et du strontium.....	104
29	Intensité du trafic routier sur la RN16	111
30	Concentration en plomb et zinc au point de prélèvement sur les deux cotés de la de la RN16.....	112
31	Paramètre de la qualité de l'eau à l'irrigation Octobre 2000.....	127
31.1	Paramètre de la qualité de l'eau à l'irrigation Juin 2002.....	128
31.2	Paramètre de la qualité de l'eau à l'irrigation Octobre 2003.....	128
32	Paramètre de la qualité de l'eau à l'irrigation Mars 2004.....	129
33	Résultats obtenus après interprétation des diagrammes de Richards	132
34	Résultats obtenus après interprétation des diagrammes de Wilcox.....	132
35	Méthode et paramètres.....	136
36	Méthode choisies.....	137
38	Notations accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC.....	139
39	Facteurs de pondération.....	139

40	Notation et pondération selon la profondeur	140
41	Notation et pondération selon la recharge efficace.....	141
42	Notation et pondération selon la nature de la zone saturée.....	142
42	Notation et pondération selon la nature de sol.....	142
44	Notation et pondération selon la topographie du terrain.....	143
45	Notation et pondération selon la nature de la zone non saturée.....	144
46	Notation et pondération selon la perméabilité	144
47	Combinaison des niveaux d'information.....	146
48	Intervalles des classes.....	149
48.1	Calcul de l'indice de contamination.....	149

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les eaux souterraines sont confrontées à un risque de dégradation, à cause des rejets non contrôlés, de l'utilisation intensive et anarchique des engrais chimiques dans l'agriculture ainsi que d'une exploitation désordonnée de cette ressource. Les conséquences sont une modification chimique de l'eau, qui la rend impropre aux usages souhaités, en plus d'une sécheresse zonale qui a sévit, ce qui a engendré une désertification rendant le domaine de l'eau de plus en plus vital et fragile, nécessitant pour sa préservation le contrôle et la maîtrise de la gestion de cette ressource.

Entre la longitude 2°W, 13°22 E et la latitude 18°N, 37°N s'étend l'Algérie, caractérisée par trois types de climats, à savoir un climat méditerranéen, limité à une bande parallèle à la mer Méditerranée, un climat semi-aride dans la zone des hauts plateaux, et un climat aride au sud, repoussant ses limites de plus en plus vers le nord, ce qui provoque la désertification progressive des régions jusqu'à la zone semi-aride.

Cette thèse a pour cadre ce type de région à climat semi-aride. Elle s'intéresse à la vulnérabilité et au risque de pollution chimique de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma EL Abiod, où l'on constate une dégradation progressive de la qualité des eaux souterraines.

A travers cette thèse, une discussion descriptive sur l'alimentation de l'aquifère, la circulation de l'eau, l'évolution de son chimisme, l'influence des conditions climatiques et hydrogéologiques a été engagée dans le but de proposer une cartographie de la vulnérabilité et du risque de pollution chimique d'un réservoir souterrain, qui constitue un véritable château d'eau pour la région d'El Ma El Abiod.

Cette thèse s'organise en sept chapitres.

La situation géographique, le milieu naturel et la géologie de la région ont été présentés dans les deux premiers chapitres, où nous avons essayé de montrer les différentes phases lithologiques, paléogéographiques et tectoniques liées à l'histoire géologique de la région, ainsi que les contraintes que subit un aquifère composé de sable et de grès d'âge miocène, limité entre deux accidents tectoniques qui contribuent à son alimentation.

Le troisième chapitre a été consacré à la climatologie de la région, malgré le manque de données en absence de stations fonctionnelles. Plusieurs calculs abordés pour la mise au point d'un bilan négatif qui ne permet pas une recharge satisfaisante de l'aquifère en question.

Le quatrième chapitre est relatif à l'analyse hydrodynamique de l'aquifère, basée sur l'étude de la circulation de l'eau, de son origine, son évolution dans le temps et dans l'espace. Il a fait aussi l'objet d'une étude expérimentale et d'une enquête exhaustive de terrain, afin d'estimer l'infiltration à partir de la surface du sol, paramètre non connu auparavant, ainsi que les retours vers la nappe après irrigation. Ces connaissances permettront de dégager les solutions à préconiser pour la préservation du système aquifère de la plaine.

Le cinquième chapitre a été consacré à une cartographie hydrochimique permettant de voir la répartition des faciès et des éléments indicateurs de pollution et de salinisation, à savoir les chlorures, les sulfates, les nutriments, le plomb, le zinc et le strontium. Ce chapitre a permis aussi la détermination des apports vers la nappe, et a révélé la dégradation de la qualité des eaux destinées à l'irrigation.

Le sixième chapitre présente le résultat de l'application de trois méthodes de cartographie de la vulnérabilité, largement expliquées dans la bibliographie et appliquées dans le monde et en Algérie, à savoir la méthode DRASTIC, la méthode du BRGM et celle des indices de contamination. Elles ont donné presque le même résultat, vu les paramètres en commun.

Le septième chapitre propose une définition de la notion du risque et des indicateurs de pollution qui permettent l'établissement d'une carte de risque, elle a permis aussi une alternative intéressante aux démarches de diagnostic du risque de pollution des eaux souterraines de la région d'El Ma El Abiod.

Chapitre 1

CADRE GEOGRAPHIQUE ET MILIEU NATUREL

A. OBJECTIF DE L'ETUDE

Les eaux souterraines représentent généralement une excellente source d'approvisionnement en eau potable. Le filtre naturel constitué par les matériaux géologiques produit le plus souvent une eau de grande qualité. Le maintien de cet avantage relatif requiert cependant que des mesures soient prises pour préserver de façon durable la qualité du réservoir naturel d'approvisionnement.

Le présent travail fait partie des études pluridisciplinaires sur la pollution et sur la qualité des eaux souterraines, notamment, celles se trouvant dans des aquifères présentant des caractéristiques en faveur de la contamination de leurs eaux. Il vise à mettre en évidence la Vulnérabilité et les risques de pollution chimique, que peut présenter le système aquifère de la plaine d'El MA El Abiod.

Dans cette étude, nous allons présenter nos observations et interprétations des mesures de terrain, pour essayer de répondre à plusieurs questions, dont les principales sont les suivantes :

- Quelle est la nature du réservoir souterrain de la plaine d'El Ma El Abiod ?
- Quel est le mode d'alimentation de ce réservoir et comment se fait-il ?
- Quel est l'état actuel de la qualité chimique des eaux souterraines de la plaine ?
- Quels sont les différents polluants chimiques existants dans les eaux souterraines la plaine et qu'elles sont leurs origines ?
- Quel sont le risque et la sensibilité du système vis-à-vis de la pollution ?

Pour répondre à ces questions, nous avons essayer de localiser sur des cartes les zones vulnérables, et celles à niveau de risque élever, quant à la pollution chimique d'une eau contenue dans un réservoir sableux, et de présenter un inventaire des causes de pollution réelles ou potentielle d'origine naturelle ou anthropique.

Les détails de nos travaux sont présentés dans cette thèse, à travers sept chapitres.

Les résultats attendus présenteraient sans doute des intérêts sur le plan d'un développement durable de la plaine d'El Ma El Abiod.

Une synthèse générale des connaissances acquises sur le bassin versant étudié, ainsi que les perspectives de recherche et de développement concluent ce travail.

B. CADRE GEOGRAPHIQUE ET MILIEU NATUREL

1. Introduction

La plaine d'El Ma El Abiod est située à 260 km de la mer Méditerranée, à la limite de la frontière Algéro-Tunisienne, elle appartient entièrement au bassin versant saharien et fait partie intégrante des hauts plateaux, qui constituent un réseau serré de montagnes de moyenne à forte altitude plus ou moins séparées par des dépressions.

La limite Nord de la plaine d'El Ma El Abiod est formée par Dj. Doukkane, Dj. Anoual et Dj. Bouroumane. Ces reliefs, constituent une ligne de crêtes importante dans la géographie locale, puisqu'elle fait partie de la ligne de partage des eaux méditerranéenne et saharienne (Fig.01). En effet, au nord de la région d'étude se trouve le bassin versant de l'oued Ksob qui draine les eaux vers la mer.

La limite Est de la plaine s'approche du territoire tunisien dans la région de Koudiat sidi salah.

A l'Ouest, on trouve la plaine de Chéria, la plus haute des régions du Sud-Est constantinois, drainée par l'oued Chéria à écoulement saharien, et sur un tronçon de 15 km, parsemé de marécages en aval de la ville. Un peu plus vers le sud, on rencontre en limite de zone, la plaine de Telidjen, caractérisée par un faible réseau hydrographique.

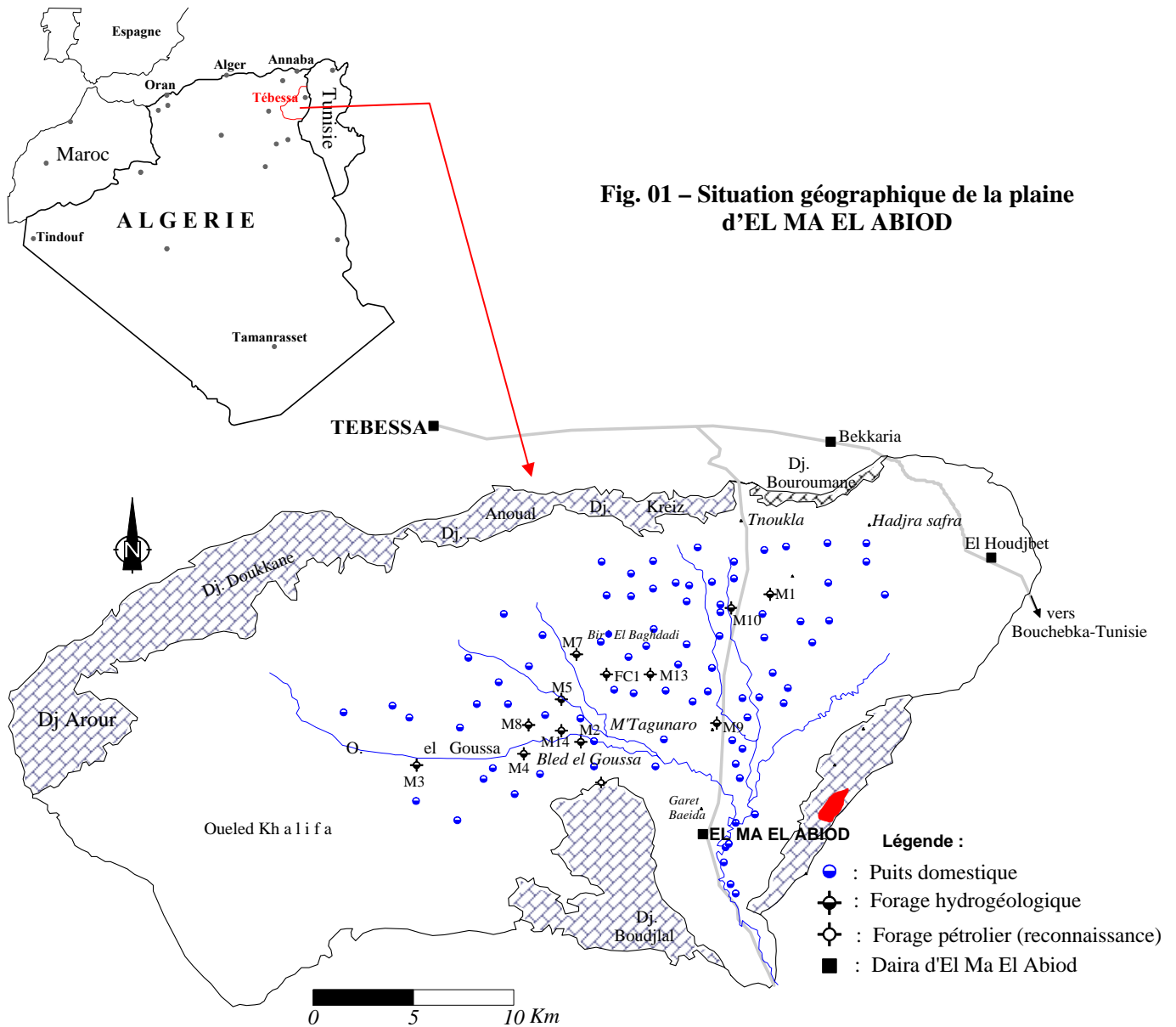
La limite Sud est constituée par le synclinal de Bir Sbeikia d'âge Mio-Quaternaire.

La large dépression mio-quaternaire d'El Ma El Abiod est entourée par des massifs calcaires. Au Nord on trouve, Djebel Doukkane, Anoual et Bouroumane, au sud, Djebel Boudjelal, Dalaa et El Gallal, tandis que des « couteaux » calcaires de faible altitude sont présents à l'Ouest de la route reliant Tébessa et El Ma El Abiod. L'altitude de la dépression, décroît du nord vers le sud depuis le Djebel Doukkane (1712m) jusqu'à la ville d'El Ma El Abiod (1019m). Elle est drainée par de multiples ravins, qui forment trois collecteurs secondaires à écoulement temporaire et torrentiel après les fortes précipitations. Ces trois collecteurs ont un tracé sinueux, résultant de la faible pente de la plaine, et creusent des lits très profonds (2 à 3m de profondeur). Ils confluent en amont de la ville en un écoulement pérenne soutenu par la nappe alluviale. La largeur du lit à ce niveau atteint 50m.

La particularité de la plaine d'El Ma El Abiod, par rapport aux autres dépressions des hauts plateaux, est l'absence de cuvettes fermées comme on peut en trouver à Tébessa, Chéria, Ain Beida ...etc. Chaque dépression a en effet, son déversoir vers un cours d'eau, où le drainage superficiel s'exerce complètement jusqu'aux bas-fonds du Sahara oriental (chott), au-dessous du niveau de la mer (-40m) pour le chott Melhgir.

2. Topographie

La région d'El Ma El Abiod présente une allure de cuvette. Son altitude varie entre 1050m (au centre de la cuvette) et 1300m vers le nord de la région étudiée (le sommet le plus haut de la région est le djebel Doukkane situé au nord et qui présente une altitude de 1712m). La partie centrale de la région est constituée d'une plaine enserrée par des montagnes escarpées au nord et au sud (Fig.02).

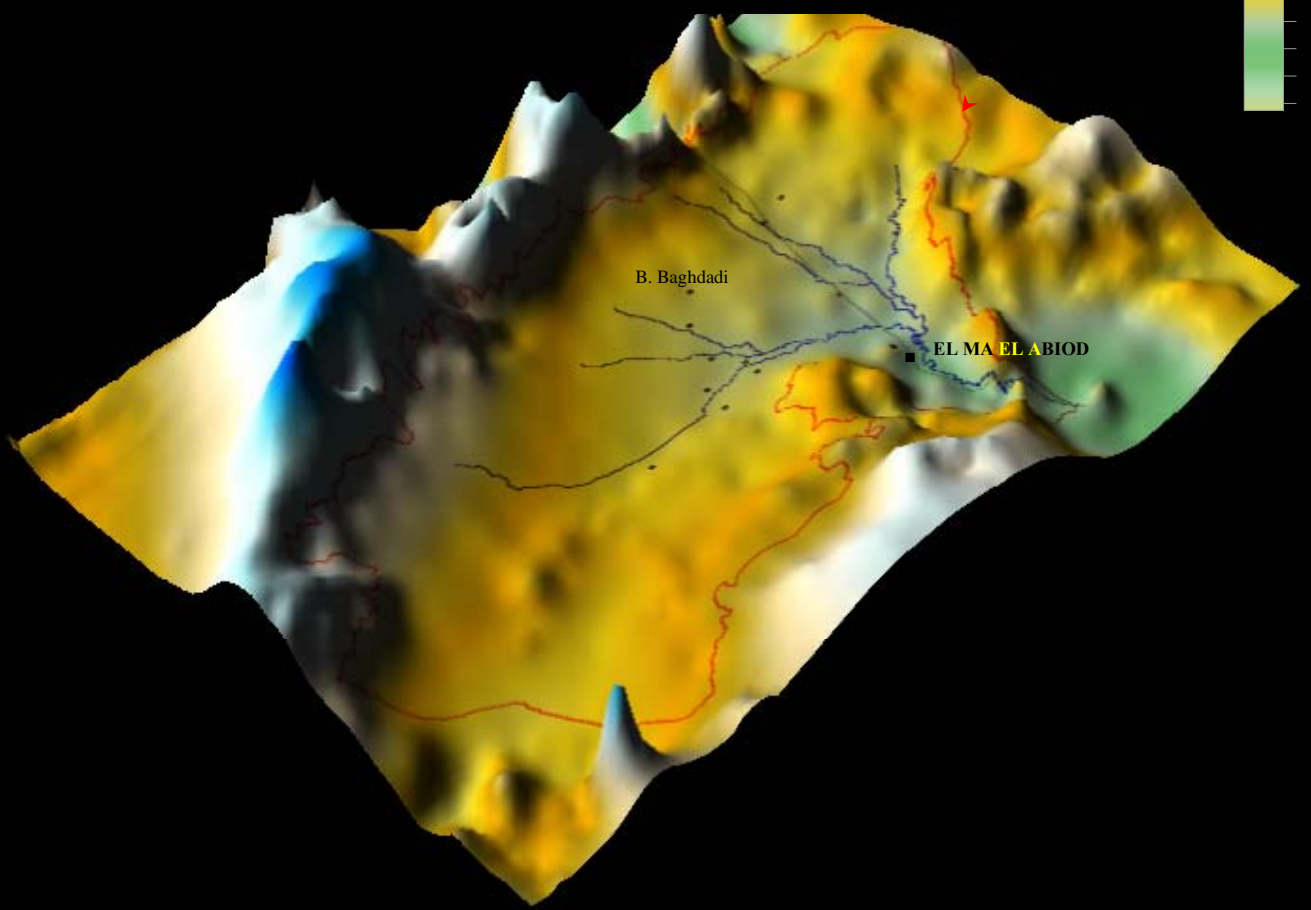
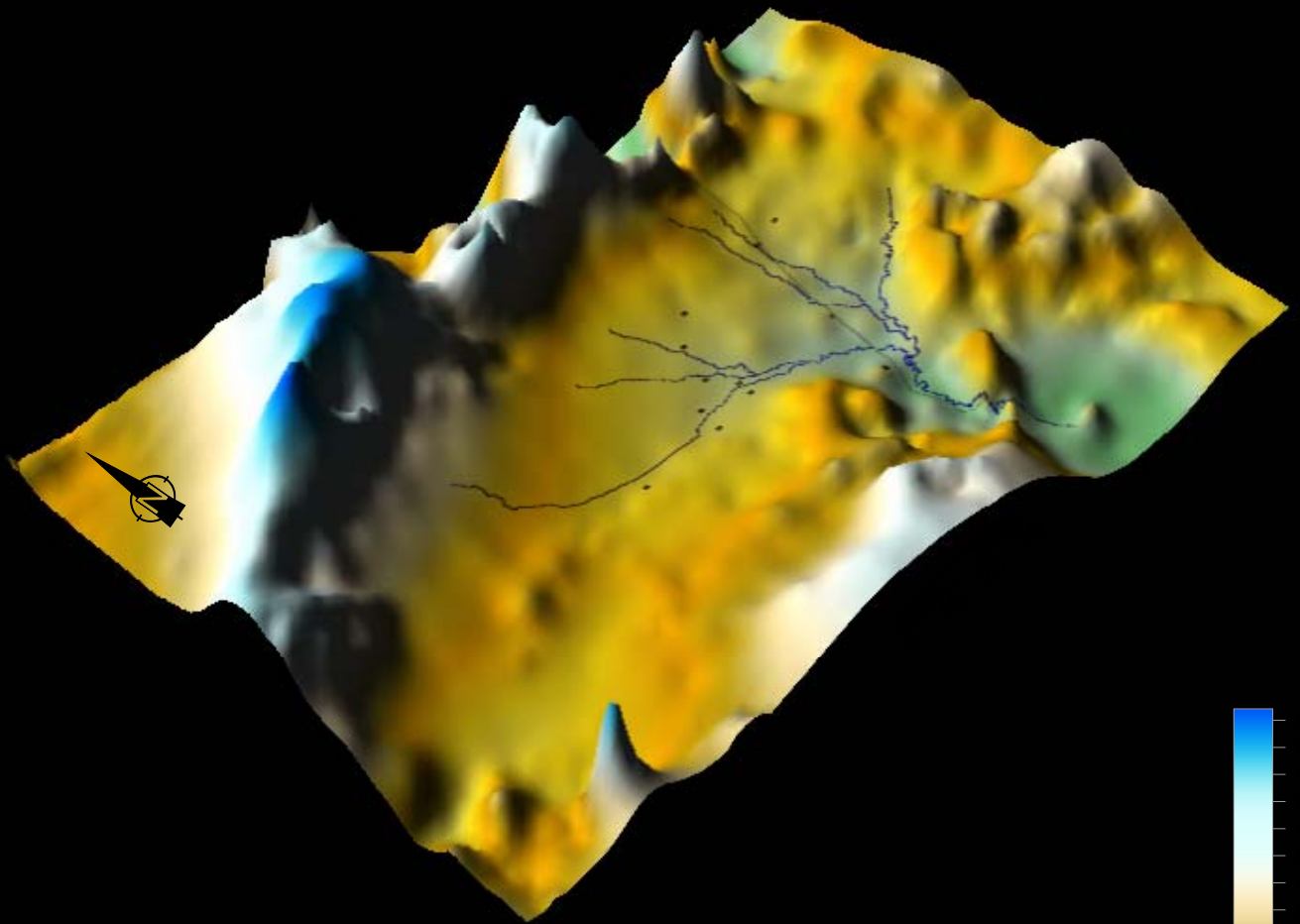


Il est à noter qu'ils existent quelques coteaux remarquables dans l'axe parallèle à la route nationale au sud de l'amont de l'oued El-Goussa, leur hauteur relative est comprise entre 10 et 20 mètres environs par rapport à la cuvette. Il s'agit probablement de la montée des couches imperméable (marnes ...).

3. Le couvert végétal

La végétation naturelle, à base de pin d'Alep, est développée au nord de la zone d'étude et devient de plus en plus rare vers le sud jusqu'à disparition en limite sud au Dj. Boudjelal. Par opposition avec les plaines de Mellégue et les monts de Tébessa, les montagnes, bordant la plaine d'El Ma El Abiod, se singularisent tout d'abord par l'absence presque totale de végétation arbustive, ne fait vraiment exception, que l'escarpement septentrional du bassin d'El Ma El Abiod, qui est recouvert d'une forêt de pins.

On peut également citer les geneviers épais du djebel Abiod et surtout des basses pentes méridionales du Djebel Arour. Partout, ailleurs, la roche ou les sols affleurent entre les touffes d'une steppe basse où domine l'Alfa



4. Economie de la région

L'économie de la région est basée sur l'agriculture et le pastoralisme. Elle est en effet à forte vocation pastorale et a d'ailleurs constitué une zone de parcours et de transhumance des troupeaux ovins, jusqu'au début des années 90. Depuis cette époque, la région connaît une activité industrielle très importante et grande consommatrice d'eau, représentée principalement par l'industrie du ciment portland (ERCE), celle du verre (SOVEST) et celle des tubes roulés (ANABIB).

La plaine d'El Ma El Abiod est traversée par la grande voie de communication nord-sud : Tébessa – El Oued et Nord- SE : Tébessa – Bouchebka vers la Tunisie.

Dans cette région, on trouve quelques vestiges archéologiques qui témoignent de conditions biogéographiques différentes du milieu, à des époques reculées.

On dénombre ainsi des sites néolithiques, dénommés escargotières, à cause de l'importance considérable des tests d'escargots d'eau douce. Ces sites se développaient en bordures des lacs existant à l'époque capsienne.

Des sites romains plus récents et plus considérables marquent le paysage, et comprennent notamment des vestiges d'anciennes huileries, rappelant l'importance de la culture de l'olivier. La richesse de la région était remarquable, puisqu'elle était appelée par les romains, la « région du blé ».

5. Hydrographiques

Au niveau des cours d'eau de surface, le nombre de rivières encaissées est limité, à tel point qu'aucune rivière permanente n'est connue. On distingue, du côté Ouest de la route nationale, l'Oued El Goussa et l'Oued Outat El Adjadj et du côté Est, l'Oued E'Znad et l'Oued El Ma-Lassouad plus à l'Est. La confluence de tous ces oueds constitue l'Oued El Abiod.

Toutefois, un phénomène intéressant mérite d'être signalé. La plus grande partie des cours d'eau descendant des versants de la chaîne Nord de montagnes vers le Sud deviennent incertains et disparaissent en aval dans la plaine, ce qui laisse à supposer que cette région doit être largement recouverte de couches très perméables.

6. Géomorphologie

L'étude géomorphologique et la prospection géologique apportent des données nouvelles à l'hydrologie. Elles sont très utiles pour la prospection des eaux souterraines des formations superficielles.

Dans la région d'El Ma El Abiod, on observe différentes micro et macro formes géomorphologiques. L'étude de ces formes permet de localiser les différentes unités aquifères.

Elle donne également des indications précieuses sur les réservoirs possibles des eaux souterraines et leurs sources d'alimentation. Les principales formes qu'on distingue sont :

6.1. Le bassin – versant

Le bassin versant est essentiellement constitué par des formations du Crétacé, (marnes, marno-calcaires) qui constituent la base ancienne sur laquelle se sont déposées les formations du Miocène (voir coupes géologiques).

On note également que les roches du Crétacé, constituant le bassin versant, sont très tectonisées (failles et plissements). Les calcaires sont parfois très karstifiés et sont importants du point de vue hydrogéologique.

6.2. La cuvette du Miocène

Les formations de remplissage du Miocène sont constituées d'argiles rouges, de sable et de grès, recouverts de colluvions et d'alluvions qui bordent les rivières.

Du point de vue hydrogéologique, ces formations sont très perméables et forment une nappe importante –objet de notre étude- reconnue par plusieurs puits et forages.

6.3. Les collines

Ce sont des formes géomorphologiques, des horsts ou des restes du bassin versant qui a subi une tectonique très intense. Elles se présentent comme des « îles » entre les formations du Miocène.

Ces collines peuvent jouer un rôle très important dans l'alimentation de la nappe aquifère du Miocène. Selon leur caractère hydrogéologique (perméabilité) et leur situation sur le terrain, elles peuvent avoir deux rôles bien distincts.

- Si elle sont constituées par des roches imperméables, (marnes, marno-calcaires, et calcaires compacts), elles forment des retenus souterraines.

- Tandis que lorsqu'elles sont perméables (calcaires karstifiés), ces collines peuvent constituer des sources secondaires pour l'alimentation de la nappe principale.

6.4. La limite Bassin versant – Cuvette du Miocène

La limite, entre les formations du Miocène et celles du Crétacé, est formée par des éboulis, qui sont bien représentés au nord de la région étudiée (voir Carte géologique). Ces éboulis sont très perméables et par conséquent très intéressants pour la prospection des eaux souterraines.

6.5. Les lits des oueds

Les lits des oueds sont des formes qui résultent de l'érosion. Dans ces lits asséchés, on a pu distinguer la terrasse et les formations du Miocène supérieur.

6.6. Les alluvions quaternaires

Dans cette région, la distinction entre haute, moyenne et basse terrasse n'est pas possible, car la puissance de ces formations alluvionnaires est faible et ne présente pas un grand intérêt hydrogéologique.

6.7. Les sources

Elles sont principalement localisées au contact entre les formations du Crétacé et celles du remplissage Miocène. Actuellement, elles sont à sec.

Chapitre 2

APERÇU GEOLOGIQUE

APERÇU GEOLOGIQUE

1. Introduction

La région d'El Ma El Abiod, est située à la limite de la frontière Algéro-Tunisienne et fait partie de l'Atlas Saharien. Les reliefs y sont contrastés, constitués essentiellement par des calcaires allongés selon un axe SW-NE, et séparés par une dépression (plaine cultivée d'El Ma El Abiod) mio-quaternaire.

Cette structure est due aux jeux de deux phases tectoniques ayant affectées la région. La plaine d'El Ma El Abiod n'a pas fait l'objet d'une étude géologique précise, mais elle est intégrée dans un ensemble géologique un peu mieux connu.

Seuls ont été réalisés à partir des années 1970, et dans le but de recherche de l'eau et du pétrolier, des forages et une étude géophysique.

La plaine a une pente douce, ayant pour limites Nord et Sud des plis d'axes SW-NE. La limite Nord constitue une ligne de partage des eaux entre deux grands bassins versants ; celui de la Medjradha qui s'écoule vers le Nord et celui de Chott Melhrir qui s'écoule vers le Sud (Fig. 03).

La couverture sédimentaire du sous-bassin versant d'El Ma El Abiod est constituée de :

- Dépôts de type épicontinental avec variation de faciès et d'épaisseur ayant une direction SW- NE (Aptien jusqu'au Maestrichtien)
- Grès et argiles bariolées de base miocène.
- Trias de type germanique sous forme diapirique.

2. STRATIGRAPHIE – LITHOLOGIE

On distingue deux grands ensembles :

- Les affleurements de bordure de la plaine, d'âge Crétacé, constituent le premier ensemble.
- Les formations d'âge Miocène et Quaternaire, qui occupent toute la superficie de la plaine, et qui constituent le second ensemble.

Ces deux ensembles constituent une série stratigraphique incomplète, (absence des formations éocènes) dont la lithologie et la répartition, sont les suivantes (Fig.04) :

2.1. TRIAS

Le terrain le plus ancien de la zone étudiée affleure dans la partie sud de la plaine à Djebel Dalaa Er Rouail, sous forme diapirique.

Il est représenté par un faciès typique de la région :

- Argile à gypse, calcaires et cargneules. Au Nord-Est et à Djebel Djebissa le Trias apparaît en pointements diapiriques.
- Argiles rouges à gypses.
- Calcaires et calcaires dolomitiques noirs en plaquettes.

2.2. CRETACE

2.2.1. Aptien moyen et inférieur

A l'extrémité Nord de la zone d'étude, au flanc Est de Djebel Bouroumane affleure un ensemble de calcaires et de dolomies. La partie inférieure est presque entièrement dolomitique. Les orbitolines sont abondantes.

Dans les intercalations de calcaires rogneux, on note la présence de quelques rudistes. L'épaisseur moyenne est de 400m.

Au sud de la plaine d'EL MA EL ABIOD, à KOUDIAT ADEILA, le forage pétrolier BOUDJELLAL-2 [**BDJ2**] a intercepté l'Aptien moyen et inférieur respectivement aux cotes 2531m et 2786m. Ainsi l'Aptien moyen se présente sous forme de calcaire gris clair à gris brunâtres, durs, compacts, bioclastiques, pseudo-oolitique et légèrement dolomitiques, avec de fines passes d'argile verte et grise légèrement carbonatée, souvent feuilletée. Son épaisseur est de l'ordre de 225m.

L'Aptien inférieur se caractérise par des alternances de marnes gris foncés, compacts, carbonatées et de calcaires gris foncés, compacts, cryptocristallins, parfois argileux. L'épaisseur moyenne est de 107m.

2.2.2. Aptien supérieur

Les affleurements qui datent de cet étage, dans la partie Nord, à Djebel Bouroumane, sont des calcaires massifs, gris ou roux avec des intercalations de quelques mètres de marnes et de marno-calcaires. L'épaisseur moyenne est de 70m au Sud. Le forage BDJ2 a rencontré l'Aptien supérieur à la cote 2316m de profondeur, il s'agit de calcaires oolithiques gris-clairs, à gris foncés, bioclastiques, parfois cryptocristallins, rarement silteux et pyriteux. L'épaisseur est de 215m.

2.2.3. Albien inférieur

Cet étage se présente à Djebel Bouroumane, sous forme de bancs calcaires bruns, épais, très durs à *Ostrea Latissima*, et de bancs de calcaires à rudistes. Au Sud de la zone d'étude le forage pétrolier BDJ2 donne de bas en haut la succession suivante :

- Des calcaires oolithiques gris-clairs, blanchâtres, brunâtres, compacts souvent crayeux bioclastiques ou graveleux, avec traces de foraminifères et intercalations d'argiles grises : 85m d'épaisseur.

- Alternance de calcaires, gris clairs, blanchâtres, souvent bioclastiques et rarement graveleux, argileux et d'argiles grises à gris foncées, noirâtres feuilletées : 87m. d'épaisseur.

- Dolomies blanches à grises brunâtres, microcristallines compactes : 40m.d'épaisseur.

2.2.4. Albien supérieur

L'Albien supérieur est présent en petits affleurements, au contact du Trias de Draa M'taa El Malabiod (Djebel Dalaa Er Rouail). Il comprend des calcaires et des marno-calcaires en plaquettes.

A Adeila, où fut exécuté le forage pétrolier BDJ2, la succession de bas en haut est la suivante :

Ca

- Alternance de calcaires gris-clairs, beiges, argileux, et d'argile grise à grise foncée, feuilletée plus ou moins dolomitique : 116m d'épaisseur.
- Alternance de calcaires gris, gris-foncé, argileux et de marnes grises noirâtres, compactes, dures, silteuses : 129m d'épaisseur.

Au Nord, à Djebel Bouroumane, les assises qui datent de cet étage forment le bas de ses pentes. Elles sont constituées d'un ensemble de calcaires et marno-calcaires gris en plaquettes et en petits bancs. On note la présence de nombreuses empreintes d'Ammonites et de Bélemnites, l'épaisseur de cette formation est de 150m.

2.2.5. Cénomanién

Il affleure assez largement dans la partie sud-est en contact tectonique avec le Trias. C'est une série de marnes jaunes parfois grises et de bancs calcaires lumachelliques. La faune est très abondante (Ostréa, Exogyra, Cardita). L'épaisseur atteint les 560m. A Adeila, d'après le forage pétrolier BDJ2 où la série du cénomanién est la plus complète, on constate de bas en haut :

- Argile grise à grise foncée, carbonatée : 238m d'épaisseur.
- Alternances de calcaires gris-clairs et d'argile grise à gris, verdâtre, feuilletée : 130m.
- Calcaires gris à gris-clair crypto cristallins avec intercalation d'argile grise à grise verdâtre feuilletée : 76m.
- Alternance d'argiles grises foncées et de calcaire gris foncé à gris clair lumachellique : 73m d'épaisseur.
- Argile grise, gris verdâtre avec intercalations de calcaires blancs, crayeux : 209.5m.
- Alternance de calcaire blanc lithographique et d'argiles grises à gris verdâtres, feuilletées : 204m d'épaisseur.
- Calcaire blanc à crème parfois gris cryptocristallin à crayeux : 39m d'épaisseur.
- Argile grise verdâtre calcareuse, fossilifère devenant marneuse dans les 16 derniers mètres avec de fines passées de calcaire gris blanchâtre, lumachellique : 72m d'épaisseur.

2.2.6. Turonien

Il affleure largement au Nord (Dj. Bouroumane, Dj. El-Koreiz, Tenoukla). A sa base, on rencontre une série constante de calcaire marneux gris en petits bancs. L'épaisseur ne dépasse pas les 60 à 70m. Au-dessous, c'est une assise massive de calcaires beiges et de dolomies ou de calcaires dolomitiques. Des rognons de silex apparaissent dans la partie supérieure.

A proximité de Tnoukla, le Turonien supérieur, épais de 150m, donne de haut en bas la succession suivante :

- Des marnes noires gypsifères.
- Des marno-calcaires gris en plaquettes.
- Des marnes noires souvent lumachelliques et rogneuses. Au sud à Djebel ED-DALAA, on note la présence de calcaires, marnes et bancs calcaires.

A 8 Km à l'Ouest de ces affleurements, le forage pétrolier BDJ2 donne de bas en haut la succession suivante :

- Calcaires bruns, crayeux, légèrement dolomitiques, partiellement lumachelliques : 109,5m d'épaisseur.

**Permis DJEBEL DOUKKANE
FORAGE PETROLIER BOUDJELLAL-2 [BDJ-2]**

Coordonnées : Géographiques :

X = 8°07'35''E

Y = 35°13'12''N

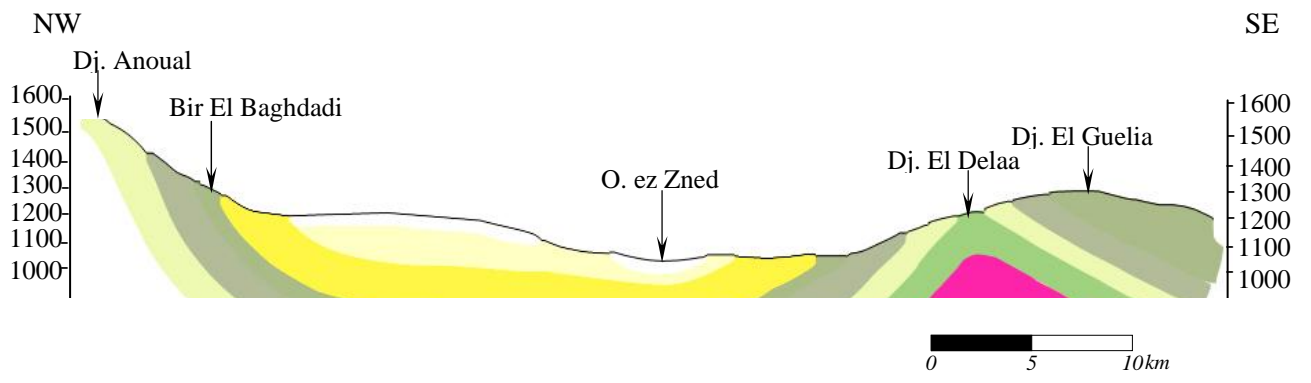
Lambert :

X = 993.533,5

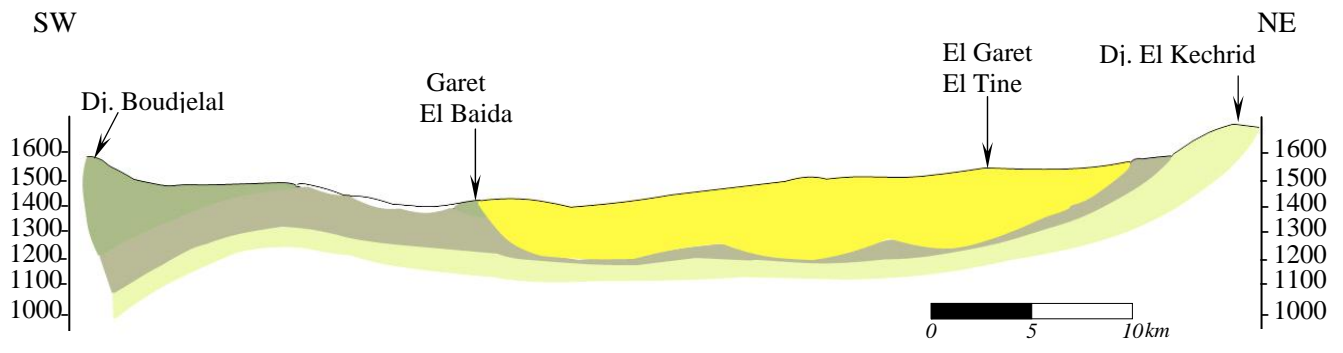
Y = 227.121,2

Z = 1120m (sol)

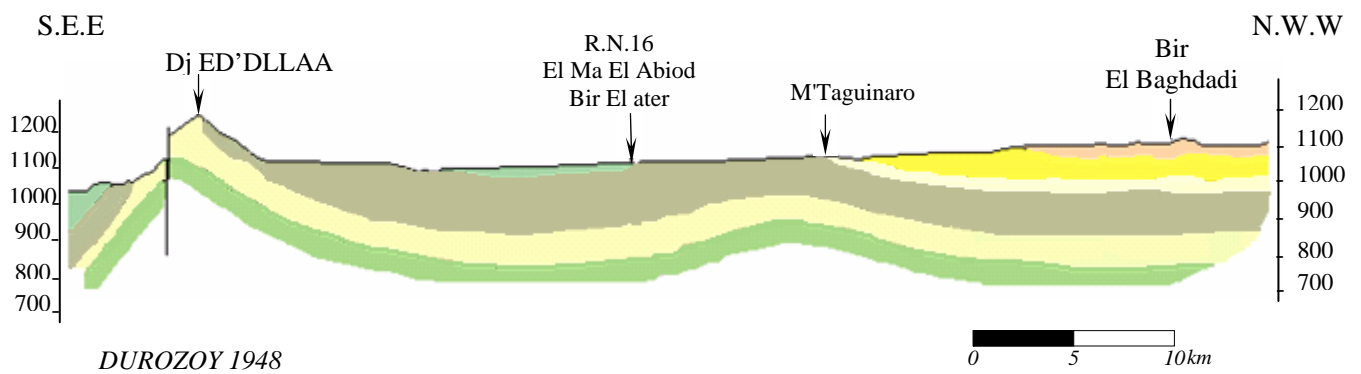
Cote	Coupe	Description lithologique	Étage
138		Calcaire blanc, compact. Biomecrite argileuse à faune pélagique	Mæstrichtien, campanien sup.
576		Argile brune rougeâtre et marnes gris verdâtre Argiles grises-fonsées, calcareuses avec rare banc de calcaire gris-claire. Argile grise avec quelques bancs de calcaire gris-claire fossilifères. Calcaire gris compact, marneux à foraminifères. Marne grise indurée, légèrement dolomitique, intercalations de calcaires bruns, souvent rouge.	Campanien inf. Emscherien
917		Calcaire gris claire, argileux, granuleux, partiellement lumachellique, compact avec fractures remplies de calcite, intercalations d'argile marneuse, grise à grise foncée, trace de calcite et de pyrite. Calcaire brun, multicolore, moyen dure, crayeux légèrement dolomitique, partiellement lumachellique bitumineux, trace de calcite blanche, translucide avec bandes d'argile verte à grise verdâtres, gluconique.	Turonien
1010		Argile gris verdâtre, calcareuse pyriteuse, fossilifères, devenant marneuse à partir de 873m avec fines passées de calcaires gris blanchâtre, lumachellique. Calcaire blanc à crème parfois gris cryptocristallin à crayeux, pyriteux. Alternance de calcaire blanc lithographique, cryptocristallin, crayeux, moucheté, lumachellique d'argile grise à grise verdâtre, feuilletées marneuse. Argile grise, grise verdâtre, feuilletée, calcareuse, finement pyriteuse, parfois légèrement glauconieuse et lumachellique avec intercalations de calcaire blanc, grisâtre lithographique, cryptocristallin crayeux avec trace de calcite. Alternance d'argiles, grises foncées, feuilletées marneuses, légèrement silteuses et de calcaire gris à gris claire, microcristallin lumachellique. Calcaire gris à gris claire induré cryptocristallin, parfois blanchâtre, crayeux avec débris de fossiles, avec intercalations d'argiles grises. Alternance de calcaire gris clair, induré cryptocristallin à passées de calcaires blancs. Argiles grises à grises foncées, carbonatées indurées, feuilletées légèrement silteuses.	Cenomanién.
2050		Alternance de calcaires gris, gris foncés parfois noirâtres, argileux. Alternance de calcaire gris clair, beige, crayeux cristallin.	Albien sup.
2093		Dolomie blanche à gris brunâtre, microcristallin bitumineuse, compacte. Alternance de calcaire, gris clair blanchâtre souvent bioclastique. Calcaire gris claire blanchâtre, brunâtre, compacte, souvent crayeux, rarement bioclastique ou graveleux, oolithique, traces de foraminifères. Calcaire gris clair, gris foncé, oolithique, bioclastique, parfois cryptocristallin. Calcaire gris claire, légèrement dolomitique avec fines passées d'argiles vertes. Alternance de marnes gris foncée compactes, argiles grises à gris foncé, feuilleté, carbonaté.	Albo-aptien.
3058		Grès blanc à gris, fins à très fin, bien consolidé, quartzitique, ciment silico-dolomitique glauconieux avec passées d'argiles grise à gris noirâtre, compact, silteuse, carbonaté. Intercalations de grès quartzitique, de siltes, d'argiles dolomitiques et de dolomies.	Baremien
3560		Dolomies, grises, brunes et beiges, cryptocristallin à microcristalline, fines passées d'argiles grises et grises noirâtres. Dolomies moyennes à fantôme de débris. Alternance de dolomies oolithiques, de calcaires dolomitiques de grés quartzitiques et d'argiles dolomitiques silteuses à 3760m. dolomies fines à huîtres.	Néocomien



In HANI 1983 Modifié




Par ROUABHIA 2004



DUROZOY 1948

Fig. 2- Coupes géologiques

Légende

 Même légende que la carte géologique

- Calcaires gris clairs, compacts, avec intercalation d'argile marneuse grise à gris foncée : 131.5m d'épaisseur.

2.2.7 Campanien inférieur – Emscherien

Il s'agit de marnes et d'intercalations de bancs de calcaires lumachelliques. Ces faciès affleurent largement à Djebel Doukkane au nord-ouest et à Djebel Ed-Dalaa.

Des affleurements de dimensions assez réduites sont à signaler à proximité de Tnoukla, M'Taguinaro et à Adeila au sud sud-ouest de la ville d'El Ma El Abiod.

D'après le forage pétrolier BDJ2 où la série est la plus complète, on constate de bas en haut :

- Argile brun rougeâtre et marnes gris verdâtres : 47m d'épaisseur.
- Argile grise avec quelques bancs de calcaires gris clairs : 83m d'épaisseur.
- Argile grise avec quelques bancs de calcaires gris clairs fossilifères : 242m.
- Marne grise indurée, légèrement dolomitique, intercalation de calcaire brun-rouge souvent marneux : 88m d'épaisseur.

2.2.8 Campanien supérieur – Mæstrichtien

Il est localisé au nord ouest à Djebel Koreiz et au centre de la plaine (M'Taguinaro), ainsi qu'aux environs de la ville d'El Ma El Abiod.

Il est caractérisé par des calcaires et marno-calcaires blancs à inocerames. A Adeila, il affleure largement sous forme de marno-calcaires blancs à inocerames. Le forage pétrolier BDJ2 a permis la reconnaissance, sur une épaisseur de 67m, du faciès suivant : Calcaire blanc compact, biomicrite argileuse à faune pélagique.

2.3. TERTIAIRE

2.3.1. Miocène

D'après le rapport de *G.DUROZOY* du **18.04.1949** et les fiches techniques des forages hydrogéologiques implantés dans la région, le Miocène affleure largement dans la partie Est de la plaine d'El Ma El Abiod ; tandis qu'au centre de la plaine il est masqué par le Quaternaire.

La série débute par des conglomérats siliceux extrêmement durs à gros rongnons de silex plus ou moins arrondis, et de petits cailloux très arrondis siliceux blancs en général.

Au sud et à l'est de M'Taguinaro ces conglomérats possèdent des silex de très grande taille, au centre de la plaine d'Oglat Chaachaa les éléments siliceux de la roche sont de taille plus réduite.

Au-dessus, viennent des grès grossiers à lits de dragées de quartz, puis des grès ferrugineux.

Au centre de la plaine d'El Ma El Abiod des grès et sables blancs sont directement transgressifs sur les calcaires maestrichtiens (forages M2, M5, M8, et M3) où les marnes emcheriennes (forages M10, M6, M7, et AT1) renferment quelques niveaux argileux. Ces grès sont soit tendres, soit cimentés formant des falaises (Hdjar safra). L'épaisseur maximale de la série est de 200 mètres, (forage hydrogéologique M8) ; elle varie d'ouest en est avec

deux maxima au centre de la plaine et au Nord-Est. Ce dépôt continental est exploité par de nombreuses carrières.

2.4 Quaternaire

La formation du Quaternaire recouvre largement la totalité de la plaine. L'épaisseur est très réduite ne dépassant pas une dizaine de mètres. Le Quaternaire est constitué en général de faciès anciens (conglomérats, croûte calcaire) et de faciès récents (éboulis limoneux).

2.4.1. Conglomérats

Ils sont formés par un mélange d'argiles, de galets, de gravillons et de cailloutis calcaires.

Le sondage hydrogéologique situé un peu au nord du village d'El Ma El Abiod, (x = 999,100 y = 228,175) a traversé une série épaisse de 20 mètres, constituée par une alternance de graviers calcaires, de gros galets à la base ou des sables grossiers et des galets calcaires. A l'Est ce conglomérat n'existe pas. L'épaisseur de la série est variable mais reste faible.

2.4.2. Croûte calcaire

Surtout développée au Nord de la plaine, cette formation de couleur blanchâtre est constituée par des éléments fins, d'épaisseur variable.

Au niveau du ravin à l'ouest d'Oglat Chaachaa, on rencontre cette croûte, épaisse de 30m, reposant directement sur le sable miocène, contenant des coquilles d'escargots bien conservées et des rognons de silex.

2.4.3. Dépôts de source

Ce sont les tufs et les travertins, résultant de la précipitation des carbonates de chaux, qu'on trouve au niveau de la source de Tnoukla. (Actuellement à sec)

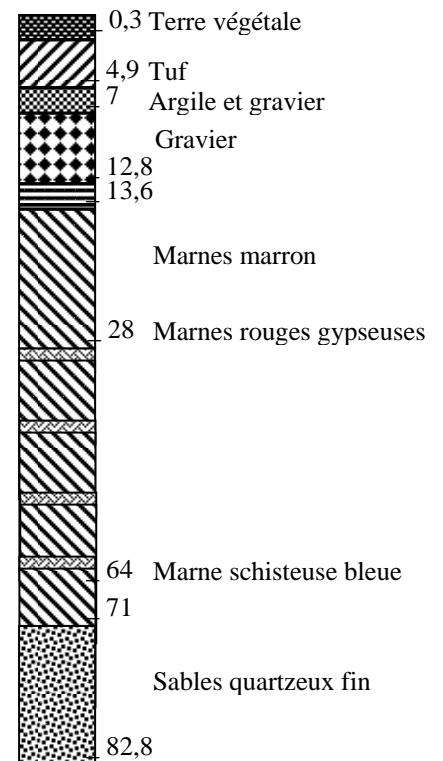
De plus, le sondage S₁. (988,350 ; 230,750) a trouvé des tufs d'une épaisseur de 4,5 mètres.

Log. Lithologique du forage S₁ (Soletanche 1953)

- x = 988.350
- y = 230.750
- z = 1106

2.4.4. Nappe des cailloux

Elle couvre une vaste région, surtout à l'ouest de la route Tébessa - El Ma El Abiod ; Ces matériaux épais ne forment jamais d'accumulations notables, ils sont de petites dimensions sauf près du relief et des coteaux.



2.4.5. Dépôts actuels

Le dépôt le plus récent est constitué par des couches limoneuses qui occupent la majorité du bas fond de la cuvette. Cette formation se charge de plus en plus en sels, qui deviennent visible au niveau de petits marais temporaires au niveau d'Oglat Chaachaa, où pendant la saison chaude, le sel arrive jusqu'à la surface en formant des cristaux.

3. TECTONIQUE

La structure tectonique de la région d'étude a dû s'édifier suite à la manifestation de deux phases orogéniques M. Villa 1977.

3.1. Première phase

Elle se manifeste dès la fin du Crétacé supérieur et inférieur. Son paroxysme se situe entre le Lutétien supérieur et le Miocène inférieur. Il s'agit bien de la phase atlasique qui constitue très certainement la phase principale de plissement dans la région d'étude. R. Laffite (1949) l'identifie par son étude sur l'Aurès comme étant la phase orogénique majeure dans l'Atlas Saharien. C'est durant cette phase que qu'il y a eu les plissements de couverture de direction SW-NE, qui donnent les grands axes anticlinaux (Dj. Bouroumane).

La faille de Tnoukla et les failles de direction NW-SE orthogonales à ces plissements datent de cette époque.

Le diapirisme du Trias a dû commencer durant cette phase tectonique qui a continué jusqu'au villafranchien inclus.

3.2. Deuxième phase

Cette phase est postérieure aux plissements précédents. Elle est responsable d'une tectonique cassante, marquée par des mouvements du socle **L. D. VISSE** (1956) considère, après les mouvements datant de cette phase, que les grands bassins délimités par les chaînes montagneuses anticlinales furent soumis certainement à des mouvements d'affaissement, donnant naissance à la plaine d'El Ma El Abiod dans sa forme actuelle (celle-ci représente parfaitement la description et l'hypothèse de L. D. Visse).

4. Style tectonique

Dans la région d'étude on reconnaît deux directions structurales dominantes qui se manifestent dans les accidents tectoniques : plissements, flexures, allongements de bassins et cassures. Elles se reflètent dans la morphologie topographique et partiellement dans l'hydrographie. Les deux directions sont SW-NE et E-W.

Les plis sont typiques de ceux reconnus généralement dans l'Atlas Saharien. Ils sont de type isopaque, donc leur provenance est du niveau structural moyen. Ils sont souvent serrés, dressés en plans verticaux, ce qui traduit un fort raccourcissement de la couverture sédimentaire. Le socle, étant plus rigide, n'a pu être raccourci comme la couverture. Il s'agit donc d'une tectonique de couverture.

4.1 Mouvements récents

La tectonique récente responsable de la genèse du fossé d'El Ma El Abiod, ne perturbe pas l'organisation des plissements plus anciens. *Castany (1954)*, *Dubourdiou (1965)* ont qualifié cette tectonique distinctive aux formations autochtones de l'Algérie orientale et de la Tunisie.

On constate une différence d'intensité de la tectonique plicatrice et cassante affectant d'une part les formations crétacées (fractures qui brisent la falaise Turonienne de Tnoukla) et la dislocation de l'anticlinal cenomanien-turonien de Draa M'Ta Abiod et d'autre part, le Miocène (plissement du grès miocène du col de Tnoukla). Cette phase serait la phase atlasique, qui est responsable des structures plissées. Il s'agit d'une phase compressive à contrainte principale orientée NN - SE.

A. Caire en 1957 a montré que ces structures résultent d'importants coulissemments qui ont affectés le socle au Plio-Quaternaire. L'ouverture des fossés résulte des déchirures dues à des fractures de distension dans la couverture, en partie entraînée par les déplacements méditerranéens dans la région d'El Ma El Abiod. Ce mouvement est caractérisé par de nombreuses déchirures de directions NE-SW et de longueurs variables, au maximum 30km. Il est représenté par trois failles (Fig.04) qui sont du sud au Nord :

- Faille F1 : située à l'Est de la ville d'El Ma El Abiod de 6km de longueur.
- Faille F2 : à décrochement très important, passe au milieu de la plaine. D'orientation NE-SW; elle change de direction et devient EW plus à l'Est près du village de l'Houidjbate. On observe environs, 30 Km de rejet.
- Faille F3 : jalonne la partie Nord de la plaine de direction NE-SW, le rejet est important, de l'ordre de 22 km

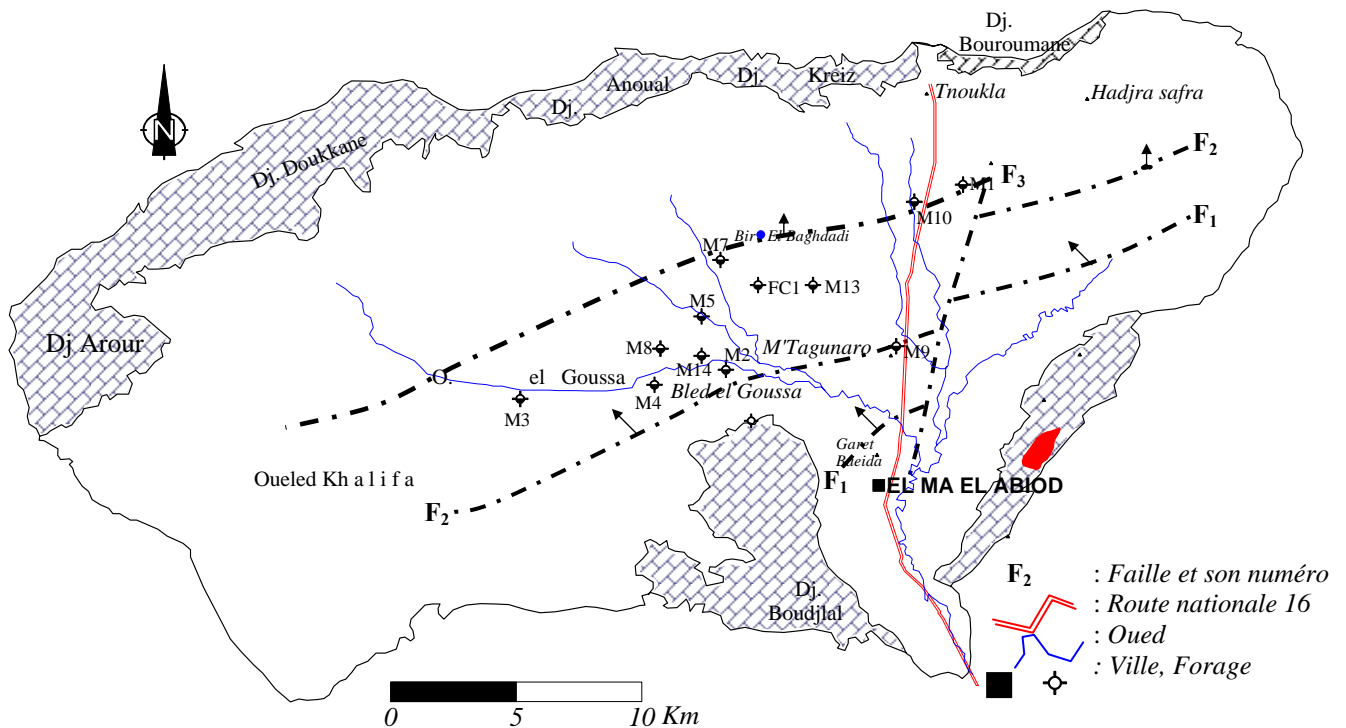


Fig.05 – Carte du système de failles (UGF-BRNO 1971)

4. Paléogéographie

Dans la région d'El Ma El Abiod, la formation autochtone la plus ancienne qui affleure est l'Aptien, représenté par l'anticlinal de Bouroumane. Le crétacé inférieur est connu par le sondage pétrolier de Boudjelal, qui a traversé le Barrémien à une profondeur de 2890 mètres et le Néocomien à 3368 mètres de profondeur.

Le Néocomien est marqué par une sédimentation néritique avec essentiellement des dolomies fines à huîtres ; au-dessous les dépôts alternes dolomies, dolomies calcaires, de grés, et argiles. Ces dépôts sont typiques d'une mer dotée d'une influence continentale. Conséquence d'un mouvement d'émersion au sud, au Jurassique supérieur, P.E. Burollet a indiqué un apport terrigène près de Tataouine (Tunisie).

Au Néocomien inférieur la sédimentation redevient celle d'une mer peu profonde, avec la disparition des apports terrigènes. A. Jouzein en 1962 a signalé le début d'une régression à l'Hauterivien et l'envahissement progressif par des dépôts continentaux. Cet apport terrigène atteint son maximum au Barrémien, où les dépôts gréseux dépassent 400 mètres d'épaisseur (sondage BJD2).

Burollet (1956) A. Jouzein (1962) signalent que l'ensemble de la Tunisie centrale a été recouvert de sable d'une épaisseur variable. Ce passage terrigène venant du sud, indique la reprise de l'orogénèse qui dure du Néocomien inférieur jusqu'à l'Aptien inférieur. Pendant cette période l'érosion dégrade les continents émergés au sud ce qui alimente les zones septentrionales en sable. Cette régression régionale qui a persistée durant le Barrémien prend fin à l'Aptien inférieur qui voit le début d'une transgression marine, caractérisée par des dépôts de mer peu profonde. La sédimentation est carbonatée de type plate-forme avec une subsidence plus importante au nord qu'au sud.

Cette sédimentation est marquée par l'effacement de la plate-forme. Le début de l'albien est marqué par une réduction dans l'espace des dépôts carbonatés. La région d'El Ma El Abiod semble connaître alors, de manière générale, des dépôts terrigènes essentiellement calcaro-argileux, de caractère plus profonds que leurs prédécesseurs carbonatés.

Durant la suite de la période vont se déposer des carbonates, précédés de dépôts calcaro-argileux. L'extension de ces faciès de plate-forme épargnera la région de Morsott du Nord, par contre, aux environs de l'Ouenza, se développent des faciès terrigènes marneux.

La sédimentation albienne ne dépasse pas les 100m en surface et 250m en sondage dans le secteur d'étude, par contre elle est de 700m au Nord. Cette réduction est la conséquence, de mouvements orogéniques importants. Dès l'Aptien supérieur, une zone de haut fond va s'ébaucher.

Au SUD-EST, c'est-à-dire en Tunisie, A. Jouzein (1962) a décrit le début de l'individualisation de l'île de Kasserine.

En 1980, J.M.Villa a placé cette réduction au début de la migration du Trias.

La fin de l'Albien et le début du Cénomaniens sont marqués par la réapparition des faciès terrigènes calcaro-argileuses et par l'enfoncement de la plate forme. P. F. Burollet 1957 signale l'arrivée de la transgression sur de vastes surfaces.

R. Laffite en 1949 a décrit le paysage des temps crétacés, en les comparant avec les côtes basses, et les estuaires actuels des contrées sénégalaises.

Durant la suite de la période cénomanienne, la sédimentation reste homogène avec des dépôts de mer épinéritique. Le début des temps turoniens est marqué par des dépôts carbonatés, qui vont envahir l'ensemble de la région d'étude.

La sédimentation carbonatée turonienne de type récifale plutôt que de plate forme, caractérise les dépôts d'une mer agitée et renouvelée.

Cette série présente une réduction sédimentaire importante (30m). On note ce même phénomène décrit par R. F. Brollet (1957) dans la région de Kasserine où il est la conséquence de l'instauration des formations deltaïques. L'île de Bouroumane s'est probablement instaurée durant le Turonien.

5. Conclusion

L'étude géologique de la région d'El Ma El Abiod nous a permis de dégager les premières remarques sur l'évolution géologique de la région.

La région faite partie de l'Atlas Saharien. Elle est limitée par des plis d'axes NE-SW au Nord et au Sud, il s'agit d'un haut plateau où on peut distinguer deux grands ensembles :

- Les affleurements de bordure d'âge Crétacé ;
- Les formations d'âge Miocène et Quaternaire occupant la totalité de la plaine.

La plaine se présente comme une cuvette, dont le substratum crétacé, calcaireux et marneux, est séparé du Miocène par des éboulis très perméables.

Sous forme de tableau, nous présentons l'intérêt hydrogéologique et hydrochimique des formations décrites au présent chapitre :

Formation	Epaisseur	Intérêt hydrogéologique	Intérêt hydrochimique
Calcaire	Plus de 100m	Alimentation du système aquifère	Eaux généralement bicarbonatées calciques
Marnes	Environ 50m	Aucun	A l'origine des sulfates
Grés	Plus de 50m	aquifère	Plusieurs faciès
sables	40 – 250m	aquifère	Plusieurs faciès

Tab. 01- Intérêt hydrogéologique et hydrochimique

Chapitre 3

HYDROCLIMATOLOGIE

HYDROCLIMATOLOGIE

1. Introduction

L'Algérie, de par sa position en latitude, correspond à l'une des zones de contact et de lutte entre des masses d'air d'origine ou d'affinité polaire et arctique d'une part, et des masses d'air dites tropicales d'autre part. Les avancées des premières vers le Sud au delà de 30°N ne sont exclues en aucune saison, surtout dans les hautes couches de la troposphère ; mais sauf exception, elles n'agissent avec efficacité dans l'évolution du temps qu'entre le début de l'automne et la fin du printemps. Quant à l'air tropical, il peut provenir de l'Atlantique ou du continent africain, par courant dirigé vers le Nord, le Nord-Ouest ou le Nord-Est. Il est susceptible d'affecter, selon les circonstances, des régions diverses du Sahara à la Méditerranée. Lorsque des masses d'air anticycloniques appartenant à l'une ou l'autre de ces deux catégories fondamentales envahissent largement une portion du Maghreb, elles y déterminent un type de temps stable, chaud ou froid en fonction de la saison. Si au contraire, l'Algérie est balayée par le passage de fronts de discontinuité, elle subit un temps capricieusement variable avec des risques de précipitations inégalement réparties d'une région à l'autre.

L'Algérie donc, du fait de sa situation géographique se trouve partagée en trois zones climatiques distinctes ; la première à climat méditerranéen au Nord, la seconde semi-aride vers l'intérieur du pays (hauts plateaux) et enfin un climat aride qui caractérise le grand Sahara.

La plaine d'El Ma El Abiod fait partie de la seconde zone, marquée par les risques et les aléas. Dans ce qui suit nous présentons un aperçu hydroclimatologique, indispensable à la compréhension des processus d'alimentation et de restriction des eaux souterraines, ce qui nous permettra d'avancer dans la connaissance du comportement hydrologique des cours d'eau, et dans la variation des réserves des eaux souterraines. Ainsi, la variation des paramètres climatiques donne des indications sur l'évolution des concentrations des éléments chimiques, en fonction des saisons, tant au niveau des eaux souterraines qu'au niveau des eaux de surface.

2. Les précipitations

2.1. Equipement de la région

La plaine d'El Ma El Abiod, est contrôlée par quatre stations pluviométriques (Tab.02), qui sont situées à l'intérieur du sous bassin. Pour des raisons de commodité, l'installation des postes a été limitée à la plaine.

Le tableau ci-dessous donne leurs principales caractéristiques.

Station	Code	Coordonnées		Altitude (m)	Appareil	Mis en service
		X	Y			
El Ma El Abiod	06.28.02	997.620	225.150	1030	PV/PG	01.01.74
M ^{cht} . E'Zouiria	06.28.07	997.750	230.000	1058	PV	01.03.74
	06.28.06	985,250	236,850	1330	PV	02.11.73
Ain Khangha	06.28.04	980,850	235.000	1335	PV	01.09.73
Ouled M'Hamed						

PV : pluviomètre PG : pluviogramme

Tab. 02- Caractéristiques des stations pluviométriques

2.2. Précipitations annuelles

Sur un cycle de vingt ans (1984/1985 – 2003/2004), nous allons examiner la variation des précipitations observées aux quatre stations. (La station d'El Khangua est hors service depuis plus de trois ans).

L'étude des variations des précipitations en fonction du temps pour la station de El Ma El Abiod montre une grande différence entre l'année la plus arrosée (1999/2000) avec 330,5mm/an et l'année la plus sèche (1996/1997) avec 57,2mm/an.

Pour la station d'E'Zouiria , l'étude des variations des précipitations montre aussi une grande différence entre l'année la plus arrosée (1995-1996) avec 330mm/an et l'année la plus sèche (2000-2001) avec 60,1mm/an .

Stations	Précipitation moyenne annuelle (mm)
EL Ma EL Abiod	204.37
E'Zouiria	229.68
Ouled M'Hamèd	220.03
El Khangua	241.15

Tab. 03- Précipitations moyennes annuelles (1984 – 2004)

2.3. Détermination de la lame d'eau précipitée

Quatre méthodes d'estimation de la lame d'eau précipitée ont été employées

2.3.1. Moyenne arithmétique des stations

C'est la méthode la plus rapide ; elle consiste à calculer la moyenne arithmétique des précipitations observées à chaque station. Cette méthode accorde une grande importance aux valeurs extrêmes. Son efficacité est meilleure pour de petits bassins où l'influence de l'altitude, de l'exposition et de la latitude sur les précipitations est partout identique.

$$\bar{P} = \frac{\sum P_i}{n} = \frac{204.37 + 229.68 + 220.03 + 241.15}{4} = \frac{895.23}{4} = 223.80 \text{ mm/an}$$

Pour la période d'observation la moyenne annuelle de la lame d'eau tombée à l'échelle du sous bassin est de l'ordre de : **224** mm/an

On peut contrôler l'adéquation de ce modèle :

Si N représente le nombre de stations sur le bassin,

σ L'écart type sur les valeurs de précipitations,

\bar{x} : La moyenne des valeurs

Cv, le coefficient de variation : $Cv = 100\sigma / \bar{x}$

On aura donc $Er = Cv / \sqrt{N}$: Er représente l'erreur en pourcentage.

On obtient pour la période d'observation une erreur de : 4.72%

2.3.2. Moyenne de THISSEN

C'est la méthode la plus adoptée pour la présente étude, les surfaces d'influences (polygones) pour chaque station sont déterminées grâce au réseau de médiatrices des segments joignant les postes deux à deux. Chaque surface partielle est affectée de la hauteur annuelle moyenne de la station concernée, la somme des volumes d'eau précipités au niveau de chaque polygone sera divisée par la surface totale du bassin versant pour obtenir ainsi la lame d'eau tombée.

Stations	Précipitations Pi (mm)	Surface Si (Km ²)	Pi.Si
<i>El Ma El Abiod</i>	204.37	199,5	40771.815
<i>M^{cht}. E'Zouiria</i>	229.68	213,3	48990.744
<i>Ain Khangha</i>	241.15	100,5	24235.575
<i>Ouled M'Hamed</i>	220.03	134,7	29638.041
		648	143636.175

$$p = \frac{\sum Si.Pi}{\sum Si} = \frac{143636.175}{648} = 221.66 \approx 222 \text{ mm/an.}$$

2.3.3. Méthode des isohyètes

Par planimétrage, on relie les points d'égale hauteur pluviométrique, on calcule la surface comprise entre deux courbes successives, ensuite on affecte à chaque surface la pluviométrie moyenne des deux courbes qui délimitent chaque surface. On obtient ainsi le volume partiel.

La lame d'eau tombée est obtenue par le quotient de la somme des volumes par la surface totale.

Cette méthode est inutilisable dans la région puisque actuellement le nombre de stations ne permet pas un planimétrage convenable.

2.4. Discussion des résultats

Les résultats de l'estimation de la lame d'eau précipitée sur le sous-bassin d'El Ma El Abiod sont résumés dans le tableau suivant :

<i>méthodes</i>	<i>Lame d'eau précipitée sur le bassin (mm/an)</i>
Arithmétique :	224
Thiessen :	222

Les résultats obtenus avec les deux méthodes présentent une différence pratiquement insignifiante, les deux valeurs obtenues s'approchent de la réalité si on les compare aux données d'observations. Mais il faut signaler que les précipitations sont surestimées par la méthode arithmétique, puisque deux stations parmi les quatre utilisées sont situées en altitude ; ce qui n'est pas représentatif des fréquences altimétriques du bassin, donc de la répartition des précipitations.

La valeur moyenne entre ces deux méthodes (**223** mm/an) sera utilisée comme moyenne unique pour l'ensemble du sous-bassin lors du calcul du bilan hydrologique.

3. Coefficient pluviométrique relatif : (H)

Ce coefficient permet de déterminer pour une station donnée si l'année est excédentaire ou déficitaire, il est défini par le rapport de la pluviométrie P d'une année, à la pluviométrie moyenne, P_{moy} , pour une période de (10ans).

$$H = \frac{P}{P_{moy}} \quad \text{Avec}$$

P : Hauteur annuelle de pluie de l'année considérée, en (mm) .

P_{moy} : Pluviométrie moyenne en (mm) .

H : Coefficient pluviométrique où coefficient d'hydraulicité.

L'année est excédentaire lorsque H est supérieur à l'unité ($H > 1$) et déficitaire quand H est inférieur à 1 ($H < 1$) comme le montre le tableau suivant :

Les tableaux ci-dessous montrent les variations de H au cours des années d'observation.

Stations Années	El Ma El Abiod	E'Zouiria	O ^{led} . M'Hamèd	A. Khengua
1984-1985	1.14	1.06	0.84	0.9
1985-1986	0.89	1.05	0.93	0.69
1986-1987	1.13	0.96	1.22	1.09
1987-1988	1.04	0.95	0.39	0.27
1988-1989	1.17	1.19	0.53	1.01
1989-1990	1.64	1.06	1.15	1.64
1990-1991	1.53	1.69	1.14	1.31
1991-1992	0.75	1.20	1.29	1.19
1992-1993	0.82	0.96	0.87	0.71
1993-1994	0.50	0.50	0.58	0.50
1994-1995	1.15	0.82	0.74	0.76
1995-1996	1.30	1.43	1.02	1.51
1996-1997	0.28	0.71	0.93	0.94
1997-1998	0.47	0.70	1.00	1.13
1998-1999	0.73	0.95	1.13	0.88
1999-2000	1.08	1.22	1.12	-
2000-2001	0.41	0.26	0.99	-
2001-2002	0.81	1.15	1.04	1.31
2002-2003	1.07	0.75	1.57	1.42
2003-2004	2.03	0.88	1.43	1.58

Tab. 04- Coefficient pluviométrique aux stations d'observation. (1984 – 2004)

4. Précipitations mensuelles

La représentation des moyennes mensuelles des relevés pluviométriques des quatre stations sur la période d'observation (20 ans) induit les remarques ci-après :

Station	Le mois le plus arrosé	Le mois le moins arrosé
El Ma El Abiod	octobre (32 mm)	Août (7.84 mm)
E'Zouiria	Septembre et août (26.8mm)	Février (08.04 mm)
El Khengua	Mars et juin (26.53 mm)	Juillet (13.04 mm)
O ^{led} M'Hamèd	Novembre et mai (23.09mm)	Février (11.96 mm)

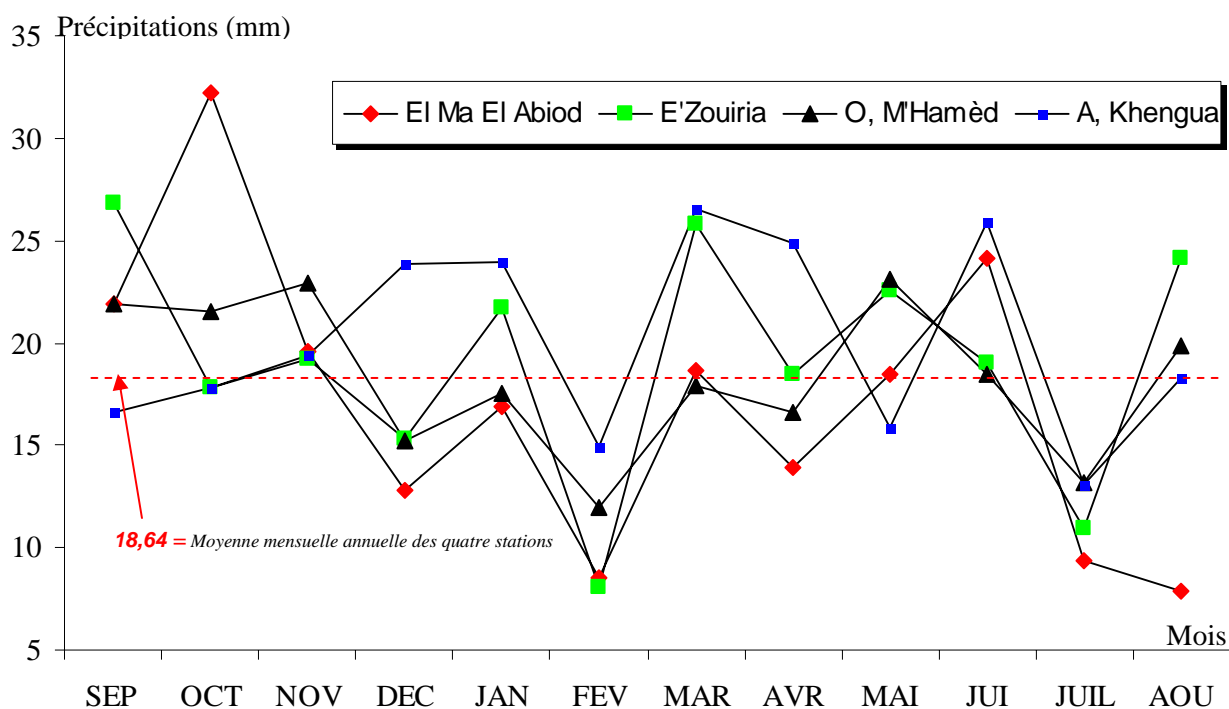


Fig. 06 – variation des moyennes mensuelles annuelles des précipitations

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
El Ma El Abiod	21.9	32	19.60	12.82	16.88	08.50	18.65	13.92	18.51	24.13	9.4	7.84
E'Zouiria	26.8	18	19.21	15.29	21.68	8.04	25.76	18.43	22.52	18.99	10.95	24.09
El Khangua	16.7	18	19.42	23.84	23.9	14.95	26.53	24.85	15.9	25.85	13.04	18.32
O ^{led} M'Hamèd	21.9	22	22.91	15.2	17.53	11.96	17.87	16.58	23.09	18.47	13.12	19.83

Tab. 05 -Précipitations moyennes mensuelles aux stations d'observation. (1984-2004) en (mm)

4.1. Distribution interannuelle des précipitations mensuelles :

L'étude des variations des précipitations en fonction du temps pour la station de El Ma El Abiod montre une grande différence entre l'année la plus arrosée (2003-2004) avec 415.9mm/an et l'année la plus sèche (1996/1997) avec 52.2mm/an.

Pour la station d'E'Zouiria , l'étude des variations des précipitations montre aussi une grande différence entre l'année la plus arrosée(1989-1990)avec 343.7mm/an et l'année la plus sèche (2000-2001) avec 60,1mm/an.

Pour les deux autre stations Ouled M'hamed et EL khengua l'année la plus arrosée est respectivement (2002-2003) avec 347.2 mm/an et (1989-1990) avec 397.06mm alors que l'année la plus sèche est respectivement (1987-1988) avec 86.45 mm/an et (1987-1988) avec 67.5 mm.

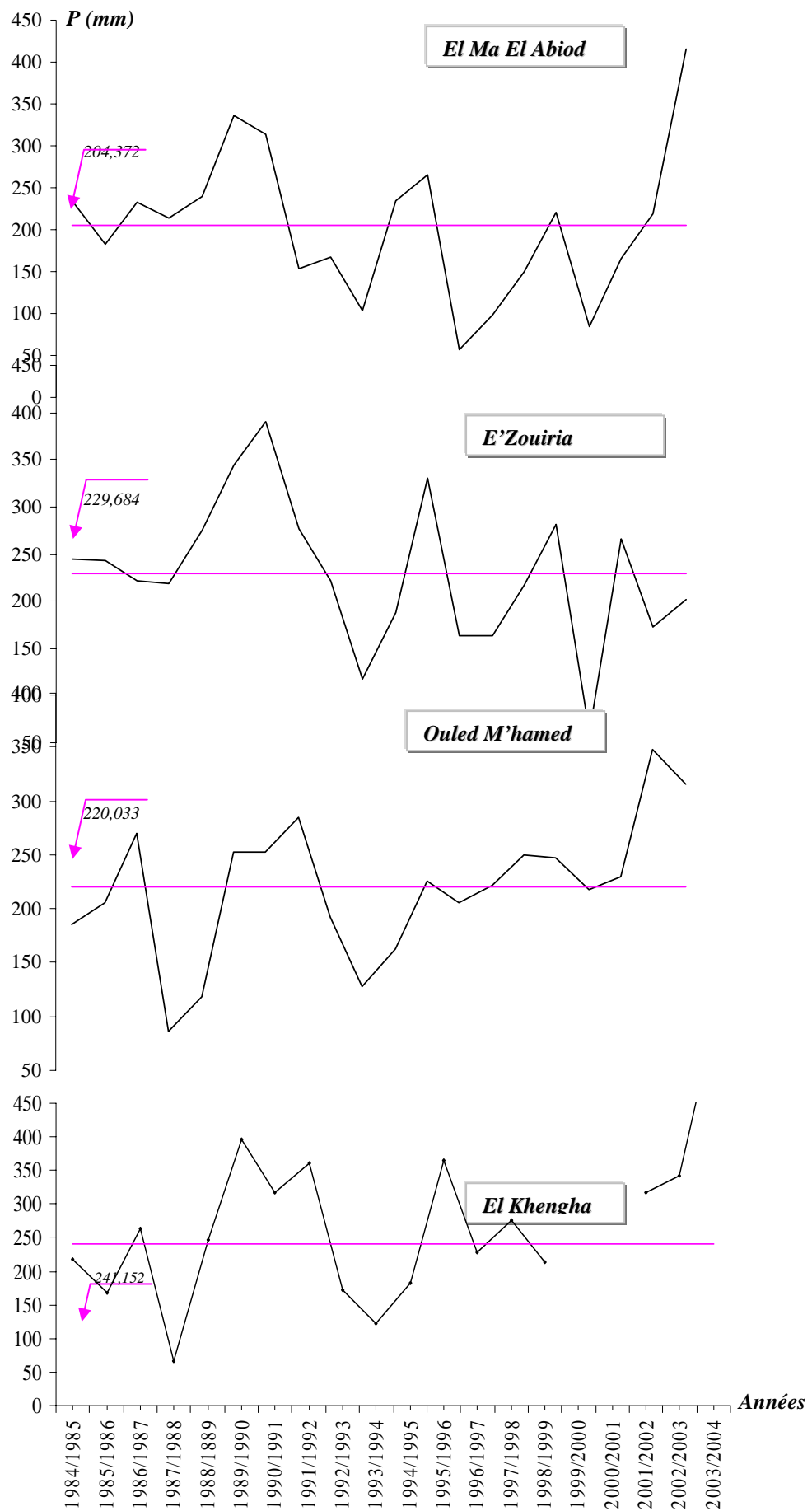
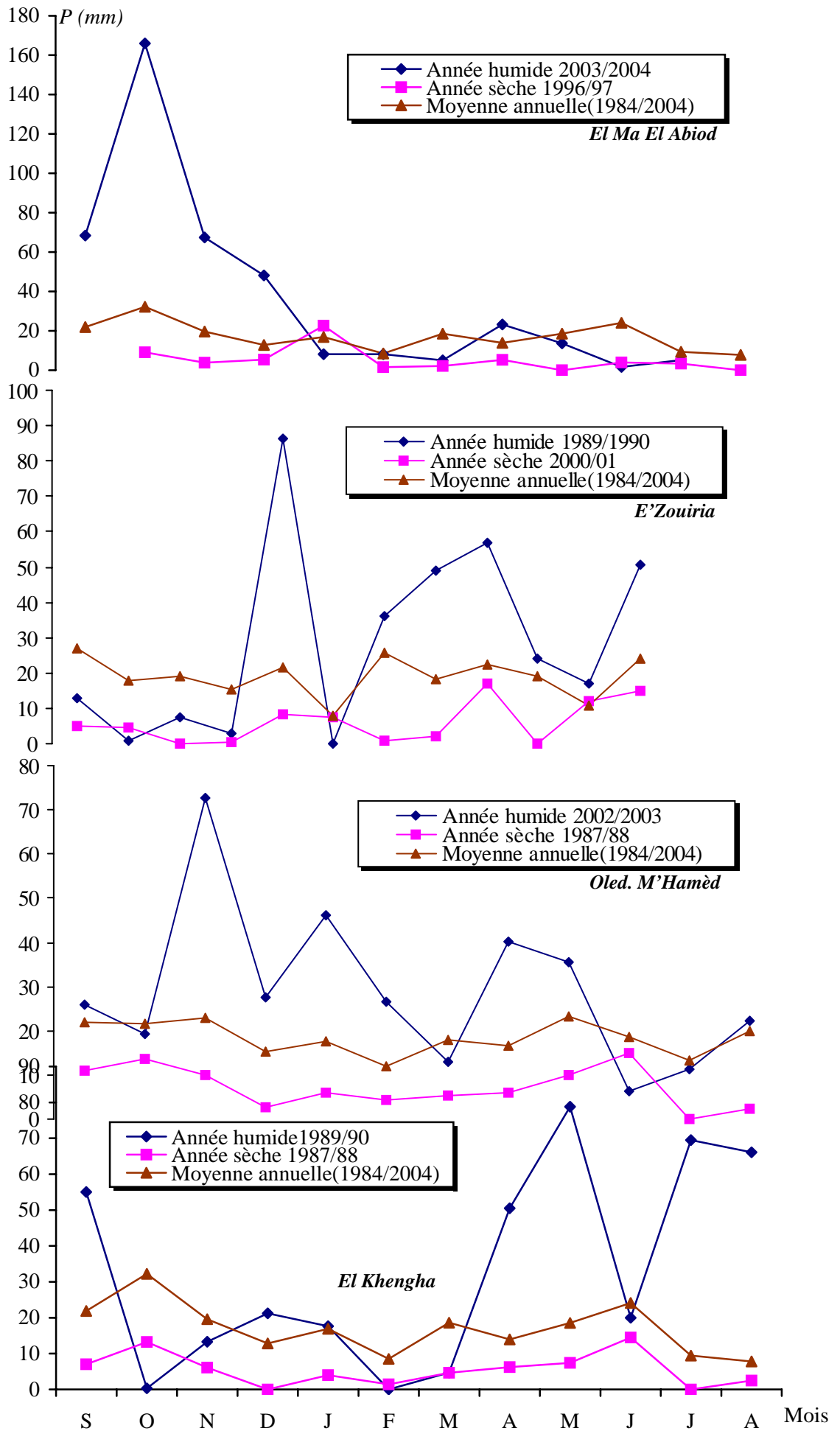


Fig. 07- Distribution des précipitations annuelles aux stations d'observation. (1984-2004)

Fig. 08- Distribution interannuelle des précipitations mensuelles aux stations d'observation. (1984-2004)



Mois et année	EL Ma EL Abiod		E'Zouiria		O. M'Hamèd		Ain El Khengua	
	2003-2004	1996-1997	1989-1990	2000-2001	2002-2003	1987-1988	1989-1990	1987-1988
Septembre	68.4	0	12.8	5	26	11.1	55	7
Octobre	166	9.1	0.9	4.7	19	14	0.4	13
Novembre	68.4	3.8	7.4	0	72.6	10	13.3	6.1
Décembre	48.2	5.4	3	0.6	27.7	2.6	21.2	0
Janvier	8.1	22.6	86.5	8.4	46	6	17.6	4
Février	8.1	1.6	0	7.5	26.7	4.45	0	1.41
Mars	5	2.1	35.9	0.8	13.1	5.2	4.73	4.68
Avril	23.2	5.3	49	2.2	40.4	5.9	50.47	6.25
Mai	13.6	0	56.7	17.2	35.4	10.1	78.8	7.37
Juin	1.7	3.9	24.1	0	6.4	15.1	20	14.5
Juillet	5.2	3.4	16.9	12.2	11.3	0	69.5	0
Août	0	0	50.5	1.5	22.2	2.3	66.1	2.5
TOTAL	415.9	52.2	343.7	60.1	347.2	86.45	397.06	67.5

Tab.06- Distribution interannuelle des précipitations mensuelles aux stations de mesures

5. La neige

Les précipitations solides (neige), sur le versant Nord des reliefs et en particulier au Dj Doukkane peuvent être importantes. Il n'existe malheureusement pas de relevés récents systématiques. D'après *SELTZER* la région se situe dans la zone d'enneigement moyen au sol de 5 à 10 jours par année. Des données fragmentaires ont montré que durant l'année 83/84 il a été enregistré 7 jours de précipitations solides, équivalent à un apport de 60mm. Durant la première semaine de février 2001, toutes les bordures nord de la plaine ont été recouvertes de neige.

Ce phénomène a un rôle important si on considère la superficie des Djebels bordant la plaine. La lente fonte de la neige favorise au maximum l'infiltration efficace.



Photo 1- La neige sur la plaine d'El Ma El Abiod. Rouabhia 2003.

6. Les températures

L'étude hydrogéologique d'un bassin devrait comporter l'analyse du caractère thermique, car l'étude de l'évolution de la température n'en est pas moins de la plus haute

importance dans les problèmes d'évaporation, d'évapotranspiration et de déficit d'écoulement.

Sur la plaine d'El Ma El Abiod, le réseau thermique est inexistant, et le manque d'archives constitue un handicap sérieux. Pour y remédier, il existe des modèles de calcul se basant sur des stations proches (de référence), où les observations sont disponibles.

Nous avons opté pour deux d'entre elles, le modèle de LAPLACE et le modèle du bureau national d'étude pour le développement rural (BNEDER)

6.1. Modèle de LAPLACE

Ce modèle repose sur deux hypothèses :

- l'accélération de la pesanteur est constante ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)
- la variation verticale de la température virtuelle de l'air est proportionnelle au gradient vertical de pression.

Définissons d'abord la température virtuelle : elle n'est autre que celle qu'aurait l'air sec dont la pression et la masse spécifique serait égale à celle de l'air humide. Pour pouvoir comparer les pressions barométriques mesurées dans les différentes stations, situées à différentes altitudes, il est nécessaire de les corriger. La norme utilisée consiste à ramener toutes les pressions au niveau de la mer. Cette réduction des pressions est effectuée à l'aide de la formule de LAPLACE. En effet, LAPLACE a utilisé le même processus pour les températures, en adoptant un gradient thermique vertical constant égal à $-0,65^\circ\text{C}$ par 100m d'altitude.

La notion de température virtuelle a été changée par la température de l'air. Après plusieurs calculs effectués sur des observations réelles, ceci a permis de montrer que l'écart entre la température de l'air et la température virtuelle est très faible (de l'ordre du dixième de degré), c'est la raison pour laquelle on les confond.

Le modèle de LAPLACE se définit comme suit :

$$T_{vm} = \frac{2T_{vl} - 0,0065(Z_2 - Z_1)}{2}$$

Où : T_{vl} : Température virtuelle de la station de référence ($^\circ\text{C}$)

T_{vm} : Température virtuelle moyenne recherchée entre les niveaux Z_1 et Z_2 ($^\circ\text{C}$)

Z_1, Z_2 : respectivement, altitude de la station à calculer et de référence (m)

Les résultats de calcul sont reportés sur le tableau (07).

6.2. Modèle de BNEDER

Le modèle se base sur des études expérimentales des différents types de climats sur le territoire Algérien, le BNEDER a mis en œuvre des formules empiriques permettant l'estimation de la température :

$$T = T_m \pm \left(\frac{h - h_m}{100} \right) * (-0,73)$$

Où : T : Température à estimer et se trouvant à l'altitude h
 T_m : Température à la station de référence d'altitude h_m .
 $-0,73^\circ\text{C}$: gradient de correction thermique calculé par le BNEDER, pour le climat semi-aride.

Cette formule repose sur les deux hypothèses suivantes :
 La variation de la température en fonction de l'altitude.
 Le signe (+-) traduit une diminution ou une augmentation de la température avec l'altitude.

6.3. Corrélation entre les deux modèles

Après avoir fait tous les calculs présentés dans le tableau 7 ; on a pris la station d'El Ma El Abiod, pour tester la fiabilité des modèles, sur notre bassin versant. Ainsi on a établi des corrélations entre les valeurs des températures calculées, par les deux modèles considérés. Pour la station d'El Ma EL Abiod, on a utiliser le modèle de LAPLACE avec les températures de Tébessa ; puis le modèle de BNEDER avec les températures de Tébessa ; et enfin celles calculées par le modèle de LAPLACE en utilisant celles calculées par le modèle de BNEDER. (fig. 9)

1- LAPLACE	1.4365			1.6185			3.419			3.3865		
2- BNEDER	T-1.6133			T-1.8177			T-3.8398			T-3.8033		
stations	<i>El Ma El Abiod</i>			<i>E'Zouiria</i>			<i>Ouled M'Hamed</i>			<i>Ain Khangha</i>		
mois	1	2	moy	1	2	moy	1	2	moy	1	2	moy
Sept.	22.21	19.88	21.04	22.30	19.68	21	23.20	17.66	20.43	23.19	17.69	20.44
Oct	17.71	15.38	16.54	17.80	15.18	16.49	18.7	13.16	15.93	18.69	13.9	16.29
Nov	12.27	9.94	11.10	12.36	9.74	11.05	13.26	7.72	10.49	13.25	7.75	10.5
Dec	9.10	6.77	12.48	9.19	6.57	7.88	10.09	4.55	7.32	10.08	4.58	7.33
Jan	7.59	5.26	6.42	7.68	6.06	6.37	8.58	3.04	5.81	8.58	3.07	5.82
Fev	9.14	6.81	7.97	9.23	6.61	7.92	10.13	4.59	7.36	10.12	4.62	7.37
Mars	11.87	9.54	10.7	11.96	9.34	10.65	12.86	7.32	10.09	12.85	7.35	10.1
Avril	14.40	12.07	13.23	14.49	11.87	13.18	15.39	9.85	12.62	15.38	9.88	12.63
Mai	19.89	17.56	18.72	19.98	17.36	18.67	20.88	15.34	18.11	20.87	15.37	18.12
Juin	23.21	20.88	22.04	23.30	20.68	22	24.2	18.66	21.43	24.19	18.69	21.44
Juil	25.74	23.41	24.57	25.83	23.21	24.52	26.73	21.19	23.96	26.72	21.22	23.97
août	25.35	23.02	24.18	25.44	22.82	24.13	26.34	20.80	23.57	26.33	20.83	23.58

Tab. 7 – Résultats des calculs des températures par les deux méthodes

Nous avons obtenu des coefficients de corrélation équivalents à **1.000**, dans les trois cas, pour des intervalles de confiance de **95%**. En réalité, ce sont des valeurs très attendues, à cause de la forme linéaire des fonctions mathématiques des deux modèles, ce qui nous met plus en confiance pour l'usage de ces valeurs dans l'étude du régime climatique du sous-bassin versant.

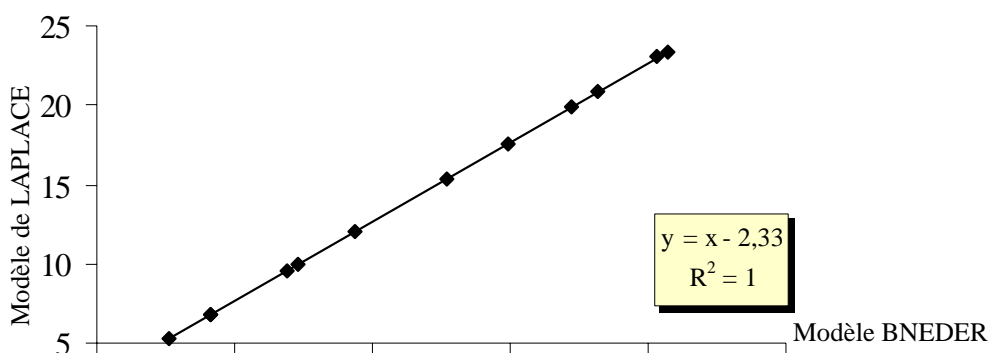


Fig. 9- Corrélation entre les températures calculées par les deux modèles

Par la suite, on a pris les valeurs moyennes des températures, obtenues par les deux modèles ; pour chaque station, lors des différents calculs.

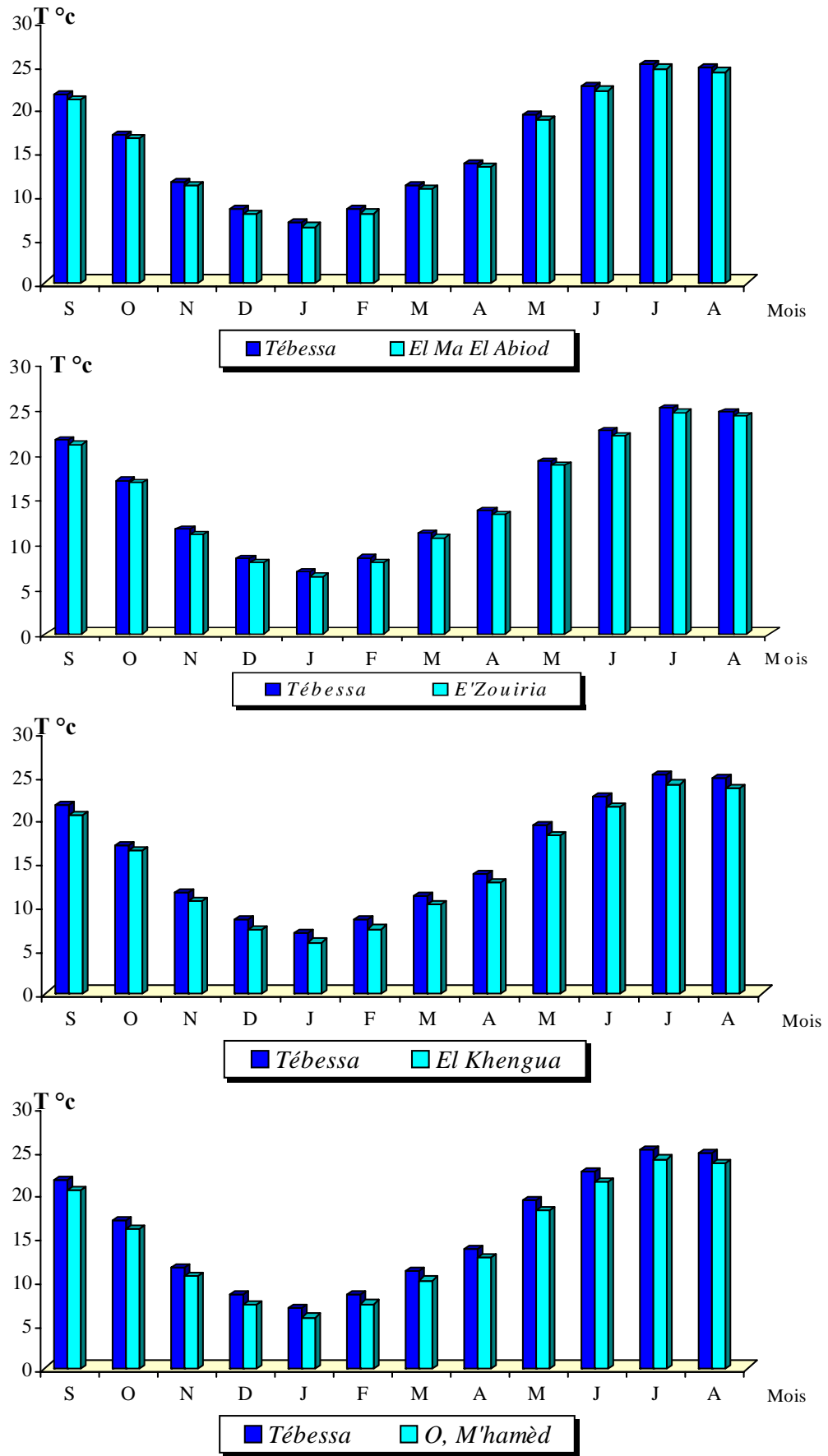


Fig. 10- Température moyenne mensuelle aux stations d'observations (1984-2004)

6.4. Régime thermique :

Le paramètre température est indispensable à la climatologie, vu qu'il rend compte de son apport d'énergie à la végétation, du pouvoir évaporateur qu'il exerce sur les surfaces mouillées, et, enfin, il est à l'origine du bon fonctionnement du cycle de l'eau.

Les températures n'ont jamais fait l'objet de mesure. La région d'étude ne possède pas de stations. La plus proche est celle de Tébessa, située à 809m d'altitude au Sud de la ville, qui a servi de référence.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
T°C	21.5	17	11.56	8.39	6.88	8.43	11.16	13.69	19.18	22.50	25.03	24.64

Tab. 8 - Températures moyennes mensuelles (1984/85-2003/04)

Quantitativement, on peut constater qu'en hiver il fait plus froid sur la plaine d'EL Ma EL Abiod, que sur celle de Tébessa ; puisque la plaine d'étude est située à une altitude plus importante (1150m en moyenne). Par contre, les températures d'été sont comparables ou légèrement plus élevées, à cause de l'influence du vent du Sud (Sirocco). Le mois le plus froid est le mois de Janvier alors que le plus chaud est Juillet.

6.5. Calcul de l'indice d'aridité

6.5.1. L'indice climatique de DE MARTONE 1923

Défini par la formule et la classification suivantes :

$$I = \frac{P}{T + 10} \quad \text{où :}$$

I < 5	: climat hyperaride
5 < I < 7,5	: climat désertique
7,5 < I < 10	: climat steppique
10 < I < 20	: climat semi-aride
20 < I < 30	: climat tempère.

P : précipitations annuelles moyennes (mm)
T : températures annuelles moyennes (c°)

D'après cette classification, le climat est de type steppique pour l'ensemble des stations

Stations	P (mm)	T(c°)	I	Observations
EL Ma EL Abiod	204.37	15.75	7.93	Climat steppique
E'Zouiria	229.68	15.32	9.07	
Oled M'Hamèd	220.03	14.76	8.88	
El Khengua	241.15	14.80	9.72	

6.5.2. L'indice d'aridité mensuel 1923

L'indice mensuel (i), donné par la formule : $I = \frac{12P}{T + 10}$

Avec : P : moyenne mensuelle des précipitations en mm
T : moyennes mensuelle des températures en c°

Cette équation définit l'évolution des conditions climatiques au cours de l'année, donne les résultats des stations de mesures qui sont présentés dans le tableau suivant :

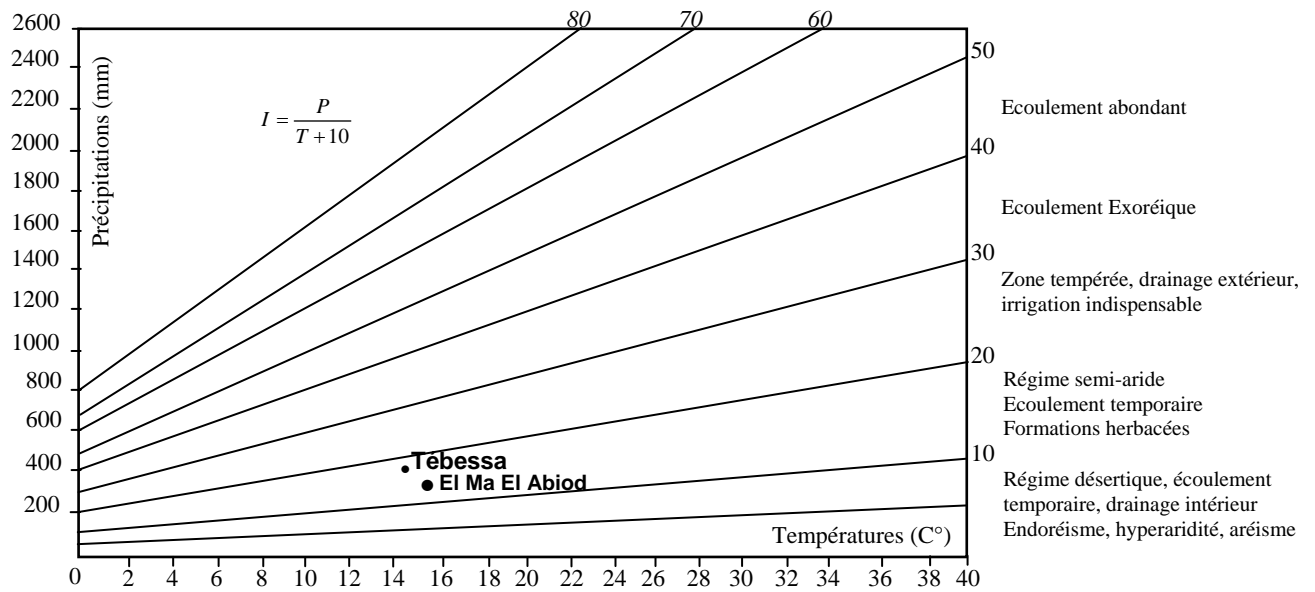


Fig. 11 – Abaque de l'Indice d'aridité Annuel de DE Martone 1923

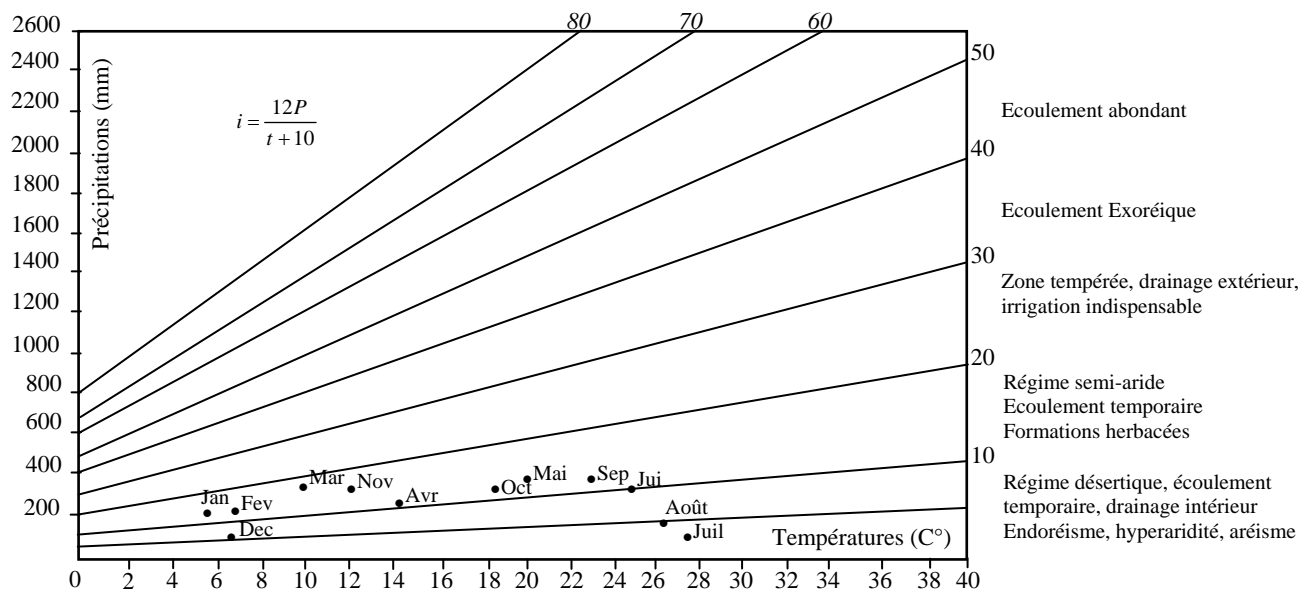


Fig. 11.1 – Abaque de l'Indice d'aridité Mensuel de DE Martone 1923

mois	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fev.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août
El Ma El Abiod												
i	8.46	14.46	11.14	8.58	12.33	5.10	10.81	7.19	7.76	9.03	3.26	2.75
E'Zouiria												
i	10.37	8.15	10.95	10.26	15.89	5.38	14.96	9.54	9.42	7.12	3.80	8.46
O. M'Hamèd												
i	8.63	10.18	13.41	10.53	13.3	8.26	10.67	8.79	9.85	7.05	4.63	7.08
A. El Khengua												
i	6.53	8.21	11.36	16.50	18.12	10.3	15.8	13.17	6.78	9.86	4.62	6.55

Pour l'ensemble des stations le mois de juillet présente un climat hyperaride, les mois de septembre, mai et juin jouissent d'un climat steppique alors que le climat semi-aride marque le reste des mois.

6.5.3. Climogramme de PEGUY

Sur les axes d'un graphique, on porte pour les 12 mois de l'année :

- En abscisse les températures moyennes mensuelles
- En ordonnées les précipitations moyennes mensuelles.

Ce climogramme sera complété par les lignes d'égales valeurs de l'indice d'aridité de *DE. Martonne* ($I=5$, $I=10$, $I=20$) et par la droite définissant le mois sec selon *BAGNOULS* et *GAUSSEN : $P=2T$*

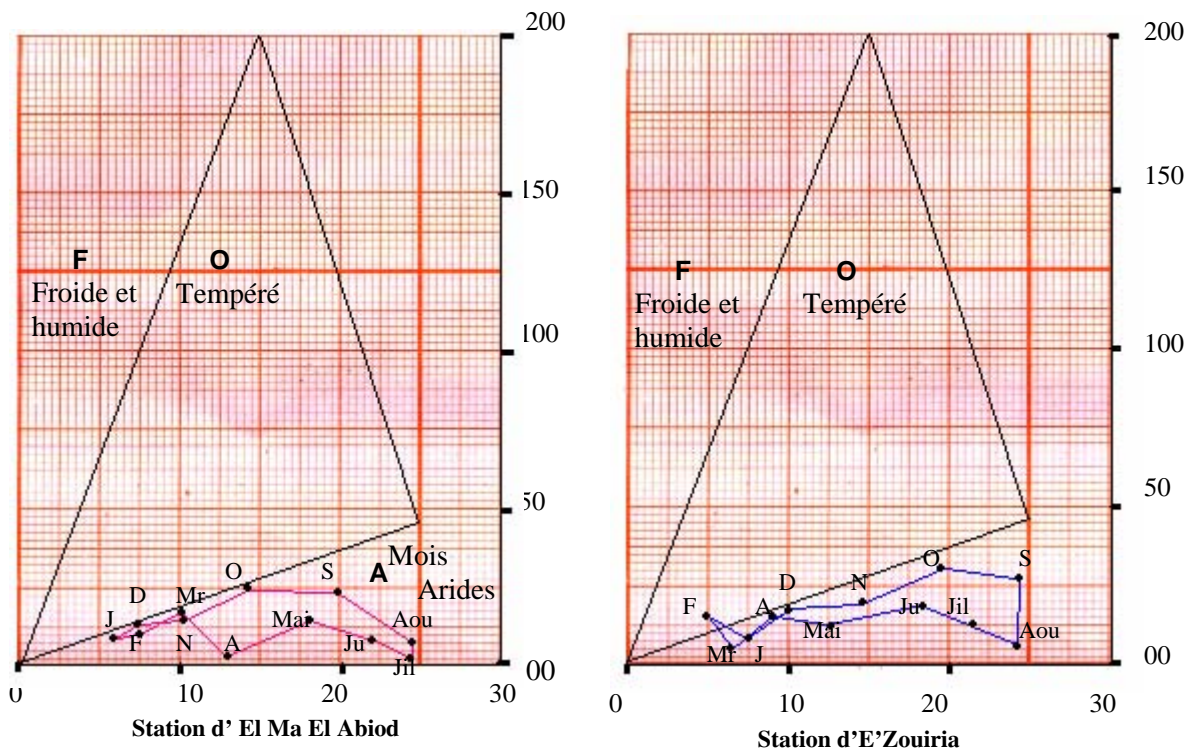


Fig. 12- Climogramme de PEGUY

Les points correspondant aux valeurs (P et T) sont réunis entre eux par des segments. L'examen des deux climogrammes confirme les constatations précédentes. La période d'observation est caractérisée par un climat semi-aride. Tous les mois se trouvent sur les figures dans la zone aride.

6.5.4. Diagramme Pluiothermique

Il a été mis au point par F. BAGNOULS et GAUSSEN. Pour eux un mois sec est celui où le total moyen des précipitations est inférieur ou égal au double de la température moyenne ($P < 2T$).

Pour cela, on construit un diagramme sur lequel on porte les températures à une échelle double de celle des précipitations et on établit mois par mois les deux courbes. La courbe des températures passe au-dessus de celle des précipitations pendant les mois secs. (fig.13)

Les diagrammes d'EL MA EL ABIOD et E'ZOUIRIA permettent de visualiser la sécheresse qui s'étale sur presque toute l'année.

6.5.5. Diagramme Ombrothermique (méthode d'EUVERTE)

Par cette méthode, on considère l'action de la chaleur et de l'humidité vis-à-vis de l'activité biologique. En effet, les besoins en eau des plantes suivent une progression exponentielle et pour un accroissement de température de 6°C les besoins en eau doublent. On établit les diagrammes ombrothermiques en adoptant une progression linéaire pour les températures et logarithmique pour les besoins en eau. (fig.14)

7. EVAPOTRANSPIRATION

L'évapotranspiration est sans doute l'une des données climatologiques les plus difficiles à approcher. Dans le bilan hydrique, elle est le terme le plus important après les précipitations, elle est la somme des quantités d'eau, exprimées en mm, évaporées à partir de la surface du sol et utilisées par les plantes. Elle est aussi difficile à évaluer à cause de sa pluri-dépendance de facteurs tant biologiques que physiques.

L'ETP : correspond à l'évapotranspiration d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau pour évaporer la quantité d'eau maximale permise par les conditions climatiques (cas des nappes superficielles peu profondes)

L'ETR : évapotranspiration réelle est une fraction de l'ETP qui dépend de l'état du stock en eau du sol.

L'expérience montre cependant qu'à l'échelle du mois, la variation de cette grandeur est peu significative et ne dépend à priori que des facteurs climatiques.

7.1. Formule de L. TURC annuelle

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

P : précipitations annuelles moyennes en (mm)

$L = 300 + 25T + 0,05T^3$ où T est la température annuelle moyenne en $^{\circ}\text{C}$.

Numériquement : les résultats sont comme suit :

EL MA EL ABIOD	: 208.54 mm/an
E'ZOUIRIA	: 234.37 mm/an
O. M'Hamèd	: 231.61 mm/an
EL K HENGUA	: 234.37 mm/an

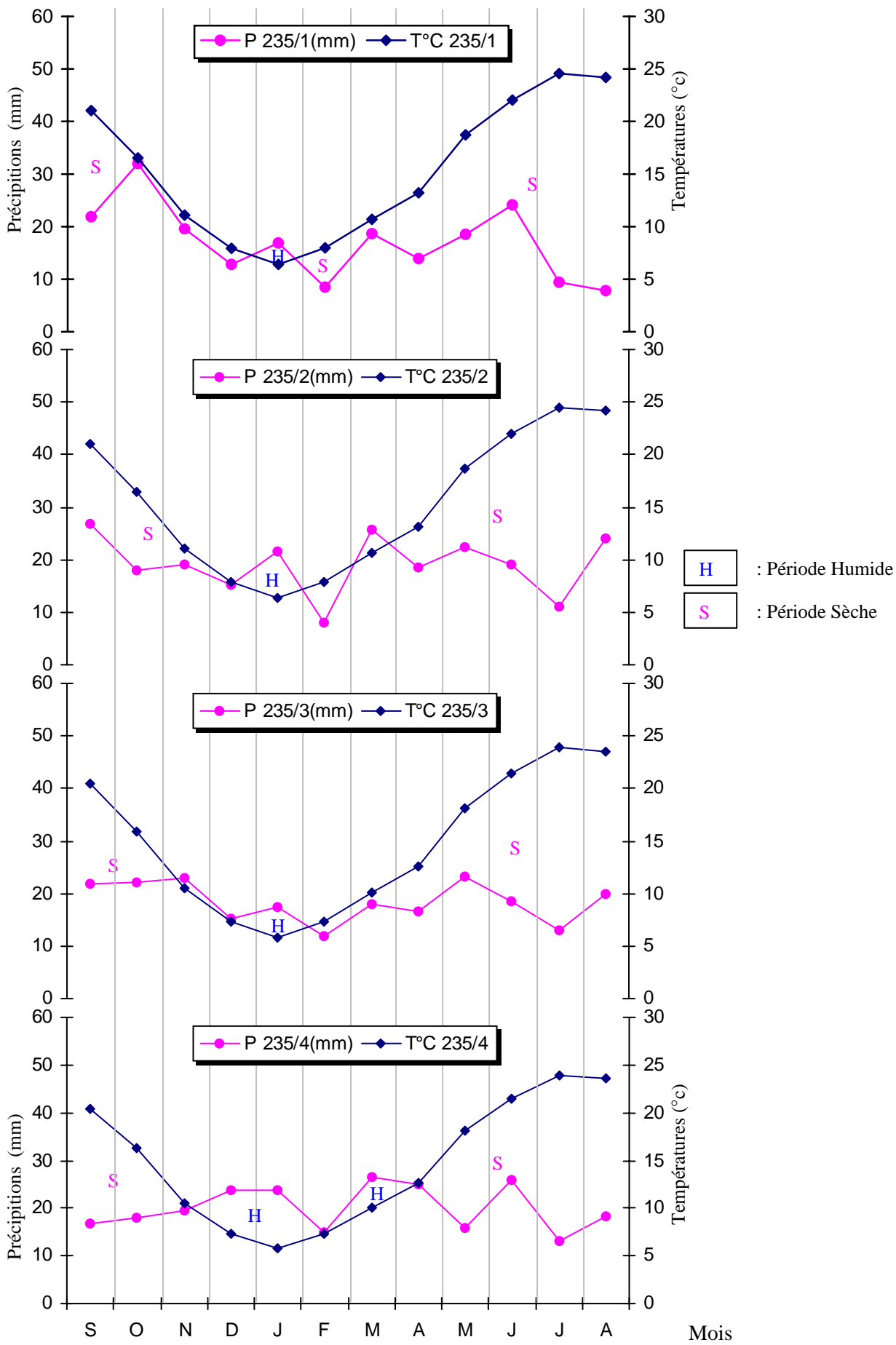


Fig. 13- Diagrammes Pluviothermiques aux stations d'observation. (1984-2004)
 235/1 : El Ma El abiod. 235/2 : E'Zouria. 235/3 : O.M'Hamèd.
 235/4 : El Khengua

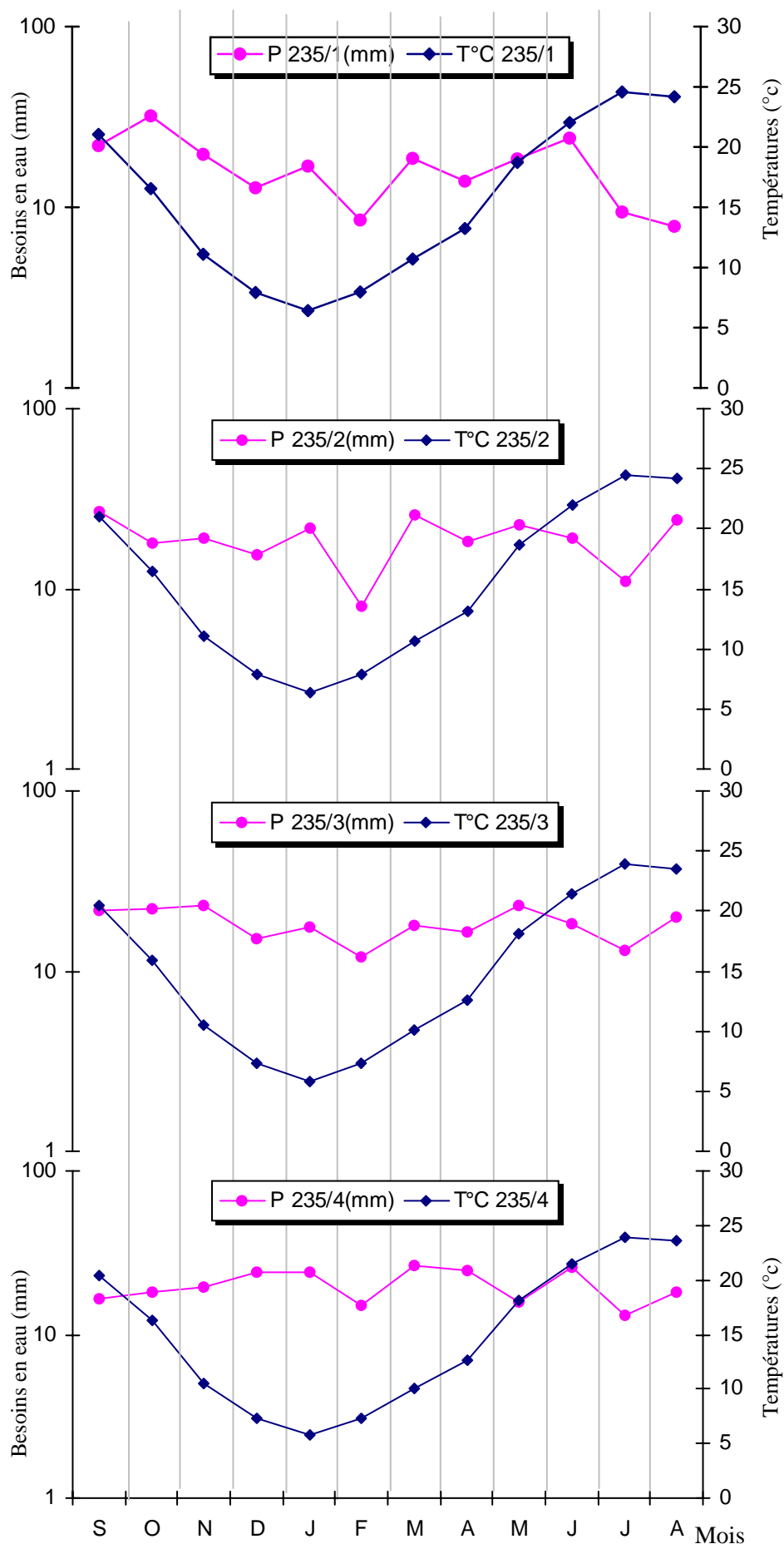


Fig. 14 - Diagrammes Ombrothèrmiques aux stations d'observation. (1984-2004)
 235/1 : El Ma El abiod. 235/2 : E'Zouria. 235/3 : O.M'Hamèd.
 235/4 : El Khengua

7.2. Formule de COUTAGNE

Donnée par la formule : $D = P - \lambda P^2$, qui peut être rapprocher de l'ETR, néanmoins elle n'est valable que lorsque les précipitations sont comprises entre 1/2 et 1/8 de λ .

$$\text{Avec : } \lambda = \frac{1}{0,8 + 0,4.T}, \quad T : \text{température moyenne annuelle en } ^\circ\text{C}.$$

Cette formule n'est pas applicable pour la région d'étude puisque la condition de départ n'est pas vérifiée.

7.3. Abaque de VERDEIL (1988)

Cet abaque permet de calculer le déficit d'écoulement en Algérie, il est applicable jusqu'à 600mm de précipitations.

Pour EL MA EL ABIOD le déficit d'écoulement est de : 267 mm/an. (Rouabhia 2001)

7.4. Formule de L. TURC mensuelle

Elle permet d'évaluer l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle ETP en tenant compte de la durée réelle de l'insolation.

$$\text{ETP} = 0,40 \cdot \frac{T}{T + 15} (I_g + 50) \quad \text{où :}$$

T : Température moyenne mensuelle en $^\circ\text{C}$ du mois considéré, (sous abri).

I_g : radiation solaire globale moyenne du mois considéré en calories/cm²/j.

Si l'humidité relative de l'air pendant le mois considéré est inférieure à 50%, on introduit un terme de correction : k

$$K = \frac{(50 - hr)}{70} : \text{hr est l'humidité relative.}$$

Ce terme sera ensuite multiplié par l'ETP du mois.

7.5. Formule de THORNTHWAITE

L'évapotranspiration potentielle non corrigée est donnée par la formule :

$$\text{ETP(mm)} = 16 \cdot \left(\frac{10T}{I}\right)^\alpha F(\lambda)$$

$$\alpha = \frac{16}{100} I + 0,5 \quad I = \sum_{i=1}^{12} i \quad \text{ou : } i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514}$$

T : températures moyennes mensuelles en $^\circ\text{C}$

I : indice thermique annuel

i : indice thermique mensuel

$F(\lambda)$: facteur de correction intégrant la durée d'insolation et le nombre de jours du mois.

L'évapotranspiration potentielle corrigée est obtenue en multipliant la formule de Thornthwaite par le coefficient de correction k qui dépend de la latitude.

Les calculs de l'ETP corrigée selon les deux formules (Turc et Thornthwaite) pour la région d'étude sur la période d'observation de 20 ans sont les suivants :

a) - Thornthwaite :

mois	Sep.	Oct.	Nov	Dec.	Jan.	Fev.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	TOT.
i	8.80	6.11	3.34	2.01	1.46	2.02	3.16	4.36	7.38	9.55	11.13	10.87	
ETP.nc	94.73	64.15	33.62	40.64	13.84	19.65	31.67	44.67	78.39	102.1	121.7	118.6	763.9
K	1.03	0.97	0.86	0.81	0.87	0.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	
ETP.c	97.57	62.22	28.91	32.92	12.04	16.70	32.62	49.13	94.85	124.6	151.0	137.6	840.2

Tab. 9 : Résultats de calcul de l'ETP par Thornthwaite

b)- Turc :

mois	Sep.	Oct.	Nov	Dec.	Jan.	Fev.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août
T	21.04	16.54	11.01	12.48	6.42	7.97	10.70	13.23	18.72	22.04	24.57	24.18
Ig	437.5	333.1	243.6	192.3	209.1	285.0	372.6	459.2	537.1	593.3	625.3	554.7
Hr%	57.0	62.98	69.72	72.62	72.33	68.36	66.38	61.93	56.20	49.17	41.52	45.12
ETP	113.8	102.2	82.93	8.55	58.44	77.86	81.18	91.38	108.2	116.0	121	120.34

Tab. 9.1 : Résultats de calcul de l'ETP par Turc

ETP (Totale) =1162.14

8. Commentaire des résultats.

Le tableau suivant résume les valeurs de l'ETP et l'ETR obtenus par les différentes méthodes :

	Méthodes	Résultats
ETP	Turc	1162.14
ETP	Thornthwaite	840.20
ETR	Turc	208.54
ETR	Verdeil	267

Tab. 10- Commentaire des résultats

Les fortes valeurs de l'ETP et de l'ETR reflètent la réalité d'une surestimation, d'un des principaux paramètres qui intervient dans les composantes des formules, il s'agit de la température. Cette dernière est en effet mesurée à la station de Tébéssa, qui fait partie du grand bassin versant de l'oued Melegue, alors que la plaine d'El Ma El Abiod fait partie du grand bassin versant d'oued Melhrir.

Le deuxième argument, c'est l'altitude. La station de Tébéssa est située à une altitude de 800m, par contre EL MA EL ABIOD est situé à une altitude de 1050m. Le massif montagneux qui sépare les deux plaines joue également un rôle-barrière (effet de fœhn).

9. Bilan hydrique par la méthode de G.W.THORNTHWAITE.

Le calcul mensuel de l'ETP et de la RFU est la base de cette méthode. Elle permet de relever deux constatations lorsqu'on compare l'ETP et la précipitation du même mois :

$P > ETP \Rightarrow ETR = ETP$ et on aura un excédent.

$P < ETP \Rightarrow$ l'évapotranspiration épuisera la RFU (réserve facilement utilisable), et on aura un déficit hydrique.

10. La réserve facilement utilisable et bilan hydrique

D'après l'étude agropédologique du cabinet LE PETIT (1966/67), effectuée sur la plaine de Tébéssa, la RFU est estimée à $23 < RFU < 35$ mm, soit une moyenne de **29**mm.

Les bilans hydrologiques pour les quatre stations d'EL MA EL ABIOD sur vingt ans (1984/85-2003/04) sont présentés dans les tableaux (11, 11.1, 11.2, 11.3) Ils permettent de voir l'étendue de la période de sécheresse qui s'étale presque sur toute l'année.

THORNTHWAITE // EVAPOTRANSPIRATION ET BILAN												
STATION : EL MA EL ABIOD LATITUDE : 35.5 ANNEE : 1984-2004												
	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
S	21.0	8.8	1.03	95.5	21.9	-73.6	-0.8	0.0	0.0	21.9	73.6	0.0
O	16.5	6.1	0.97	61.2	32.0	-29.2	-0.5	0.0	0.0	32.0	29.2	0.0
N	11.1	3.3	0.86	28.7	19.6	-9.1	-0.3	0.0	0.0	19.6	9.1	0.0
D	7.9	2.0	0.81	15.8	12.8	-3.0	-0.2	0.0	0.0	12.8	3.0	0.0
J	6.4	1.5	0.87	12.1	16.9	4.8	0.4	4.8	4.8	12.1	0.0	0.0
F	8.0	2.0	0.85	16.7	8.5	-8.2	-0.5	-4.8	0.0	13.3	3.4	0.0
M	10.7	3.2	1.03	32.4	18.7	-13.7	-0.4	0.0	0.0	18.7	13.7	0.0
A	13.2	4.4	1.10	48.6	13.9	-34.6	-0.7	0.0	0.0	13.9	34.6	0.0
M	18.7	7.4	1.21	93.0	18.5	-74.5	-0.8	0.0	0.0	18.5	74.5	0.0
J	22.0	9.4	1.22	121.8	24.1	-97.7	-0.8	0.0	0.0	24.1	97.7	0.0
J	24.6	11.1	1.24	147.3	9.4	-137.9	-0.9	0.0	0.0	9.4	37.9	0.0
A	24.2	10.9	1.16	134.3	7.8	-126.5	-0.9	0.0	0.0	7.8	126.5	0.0
MOY (Tp) = 15.37 SOM(ETPC) = 807.26 SOM(Pr) = 204.15 BH = -603.11												
SOM(ETPR) = 204.15 SOM(Def) = 603.11 SOM(Exc) = 0												

Tab. 11- Bilan hydrique à El Ma El Abiod

THORNTHWAITE // EVAPOTRANSPIRATION ET BILAN												
STATION : EL KHENGUA LATITUDE : 35.5 ANNEE : 1984-2004												
	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
S	20.4	8.4	1.03	92.6	16.7	-75.9	-0.8	0.0	0.0	16.7	75.9	0.0
O	16.3	6.0	0.97	61.5	18.0	-43.5	-0.7	0.0	0.0	18.0	43.5	0.0
N	10.5	3.1	0.86	27.8	19.4	-8.3	-0.3	0.0	0.0	19.4	8.3	0.0
D	7.3	1.8	0.81	15.0	23.8	8.8	0.6	8.8	8.8	15.0	0.0	0.0
J	5.8	1.3	0.87	11.3	23.9	12.6	1.1	12.6	21.4	11.3	0.0	0.0
F	7.4	1.8	0.85	15.9	15.0	-1.0	-0.1	-1.0	20.4	15.9	0.0	0.0
M	10.1	2.9	1.03	31.3	26.5	-4.8	-0.2	-4.8	15.6	31.3	0.0	0.0
A	12.6	4.1	1.10	47.2	24.9	-22.3	-0.5	-15.6	0.0	40.5	6.7	0.0
M	18.1	7.0	1.21	90.4	15.9	-74.5	-0.8	0.0	0.0	15.9	74.5	0.0
J	21.4	9.1	1.22	118.1	25.9	-92.3	-0.8	0.0	0.0	25.9	92.3	0.0
J	24.0	10.7	1.24	142.5	13.1	-129.4	-0.9	0.0	0.0	13.1	129.4	0.0
A	23.6	10.5	1.16	129.8	18.3	-111.5	-0.9	0.0	0.0	18.3	111.5	0.0
MOY (Tp) = 14.8 SOM (ETPC) = 783.52 SOM (Pr) = 241.35 BH = -542.17												
SOM(ETPR) = 241.35 SOM(Def) = 542.17 SOM(Exc) = 0												

Tab. 11.1- Bilan hydrique à El Khengua

THORNTHWAITE // EVAPOTRANSPIRATION ET BILAN												
STATION : O. M'HAMED LATITUDE : 35.5 ANNEE : 1984-2004												
	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
S	20.4	8.4	1.03	92.7	21.9	-70.8	-0.8	0.0	0.0	21.9	70.8	0.0
O	15.9	5.8	0.97	59.6	22.0	-37.6	-0.6	0.0	0.0	22.0	37.6	0.0
N	10.5	3.1	0.86	27.8	22.9	-4.9	-0.2	0.0	0.0	22.9	4.9	0.0
D	7.3	1.8	0.81	15.1	15.2	0.1	0.0	0.1	0.1	22.9	4.9	0.0
J	5.8	1.3	0.87	11.4	17.5	6.2	0.5	6.2	6.3	11.4	0.0	0.0
F	7.4	1.8	0.85	16.0	12.0	-4.0	-0.3	-4.0	2.3	16.0	0.0	0.0
M	10.1	2.9	1.03	31.4	17.9	-13.5	-0.4	-2.3	0.0	20.2	11.2	0.0
A	12.6	4.1	1.10	47.2	16.6	-30.7	-0.6	0.0	0.0	16.6	30.7	0.0
M	18.1	7.0	1.21	90.5	23.1	-67.4	-0.7	0.0	0.0	23.1	67.4	0.0
J	21.4	9.1	1.22	118.1	18.5	-99.7	-0.8	0.0	0.0	18.5	99.7	0.0
J	24.0	10.7	1.24	142.5	13.1	-129.4	-0.9	0.0	0.0	13.1	129.4	0.0
A	23.6	10.5	1.16	130.0	19.8	-110.2	-0.8	0.0	0.0	19.8	110.2	0.0
MOY (Tp) = 14.76 SOM (ETPC) = 782.16 SOM (Pr) = 220.46 BH = -561.7												
SOM(ETPR) = 220.46 SOM(Def) = 561.7 SOM(Exc) = 0												

Tab. 11.2- Bilan hydrique à O M'Hamed

THORNTHWAITE // EVAPOTRANSPIRATION ET BILAN												
STATION : E'ZOURIA LATITUDE : 35.5 ANNEE : 1984-2004												
	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
S	21.0	8.8	1.03	95.2	26.8	-68.4	-0.7	0.0	0.0	26.8	68.4	0.0
O	16.5	6.1	0.97	61.1	18.0	-43.1	-0.7	0.0	0.0	18.0	43.1	0.0
N	11.1	3.3	.86	28.6	19.2	-9.4	-0.3	0.0	0.0	19.2	9.4	0.0
D	7.9	2.0	0.81	15.7	15.3	-0.4	-0.0	0.0	0.0	15.3	0.4	0.0
J	6.4	1.4	0.87	12.0	21.7	9.7	0.8	9.7	9.7	12.0	0.0	0.0
F	7.9	2.0	0.85	16.6	8.0	-8.6	-0.5	-8.6	1.1	16.6	0.0	0.0
M	10.7	3.1	1.03	32.3	25.8	-6.5	-0.2	-1.1	0.0	26.8	5.5	0.0
A	13.2	4.3	1.10	48.4	18.4	-30.0	-0.6	0.0	0.0	18.4	30.0	0.0
M	18.7	7.3	1.21	92.8	22.5	-70.3	-0.8	0.0	0.0	22.5	70.3	0.0
J	22.0	9.4	1.22	121.5	19.0	-102.5	-0.8	0.0	0.0	19.0	102.5	0.0
J	24.5	11.1	1.24	146.9	11.0	-135.9	-0.9	0.0	0.0	11.0	135.9	0.0
A	24.1	10.8	1.16	133.9	24.1	-109.8	-0.8	0.0	0.0	24.1	109.8	0.0
MOY(Tp) = 15.32 SOM(ETPC) = 805.14 SOM(Pr) = 229.76 BH = -575.38												
SOM(ETPR) = 229.76 SOM(Def) = 575.38 SOM(Exc) = 0												

Tab. 11.3- Bilan hydrique à E'Zouiria

11. Estimation du ruissellement

Les méthodes d'estimation de l'évapotranspiration nous ont déjà permis d'avoir une idée sur l'écoulement. La méthode de TIXERONT-BERKALOFF permet le calcul du ruissellement, le raisonnement tenu par les deux auteurs est le suivant :

- lorsque les précipitations augmentent, le ruissellement tend à égaler les précipitations déduction faite de l'évapotranspiration plafonnée à la valeur de l'évapotranspiration potentielle
- lorsque les précipitations tendent aussi vers zéro, le ruissellement tend aussi vers zéro, et le rapport de ruissellement à la pluviométrie tend vers zéro.

Le défaut de la méthode est qu'elle ne tient pas compte de la nature des sols ou des formations traversées.

La formule est : $R = P^3 / 3E^2$ en m avec

P : pluviométrie annuelle en m et E : évaporation potentielle en m

L'application numérique donne les résultats suivants :

station	P (mm)	E	R (mm)
El Ma El Abiod	204.15	807.5	4.35
E'Zouiria	229.76	783.5	6.23
Ain Khangha	241.35	805.14	5.83
O ^{led} M'Hamed	220.46	782.16	7.63

Tab.12- Résultats du calcul du ruissellement

12. Estimation de l'infiltration

Puisque nous disposons des différents facteurs régissant l'équation du bilan hydrogéologique :

$$P = ETR + R + I$$

P : Précipitation moyenne annuelle en mm
 ETR : Évapotranspiration réelle annuelle en mm
 R : Ruissellement annuel en mm
 I : Infiltration efficace moyenne annuelle en mm

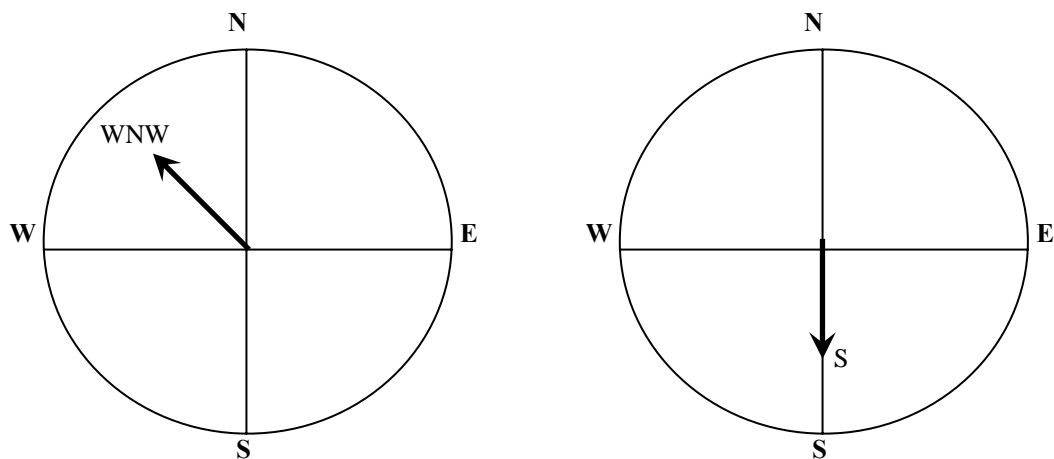
L'infiltration : $I = P - (R + ETR)$ est égale à 10.4 mm sur l'ensemble du bassin versant, mais il faut noter que seules les mesures d'infiltration in situ réparties sur les différents faciès du bassin, permettraient une meilleure approche de ce paramètre.

13. Le vent

Les vents les plus fréquents, selon la station météorologique de Tébessa, sont ceux de directions NW et SW.

Le sirocco ; vent chaud, soufflant du Sud vers le Nord, est relativement fort en été, époque où son action est négative (pouvoir évaporant et érosion éolienne). Il peut durer jusqu'à 3 jours consécutifs avec une intensité moyenne de 40 à 45 km/heure.

Généralement, la région est soumise à un passage régulier de vent de sables dirigés de l'Ouest-nord-ouest à l'Est Sud Est. Il s'étale sur une largeur de quelques kilomètres.



- a - **Fig.15- Directions prédominantes des vents** - b -
a- Période septembre à mai
b- Période Juin à août

Un autre vent de sable moins important et moins fréquent se produit dans la région d'El Ma El Abiod au Sud et suivant la même direction. Ces vents de sables fréquents et réguliers soufflent pendant une période d'environ 20 jours par an.

La direction générale des vents est présentée par les roses de la figure précédente

14. Conclusion

Le climat de la région étudiée est steppique influencé par les facteurs géographiques (altitude, éloignement de la mer et orientation des versants des montagnes) et par les facteurs atmosphériques essentiellement imposés par le régime sub-saharien. Les précipitations ont lieu à la fin de l'hiver et au début de l'été, résultant d'un contraste thermique dû à la présence de massifs élevés entourant la plaine, provoquant des mouvements convectifs qui sont à l'origine de pluies orageuses très fréquentes.

La moyenne annuelle des précipitations est de l'ordre de 224 mm/an. Le bilan hydrique et l'estimation de ces paramètres nous ont permis de faire ressortir les résultats suivants :

- Une évapotranspiration réelle de l'ordre de 208 mm /an.
- Une infiltration et un ruissellement respectivement de l'ordre de 10 mm/an et 6mm/an.
- Le bilan dans son ensemble est déficitaire.

15. LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE

La plaine alluviale d'EL MA EL ABIOD est drainée superficiellement par l'oued du même nom, constitué par la confluence en amont de la ville de trois oueds secondaires qui sont :

Oued EL MA LASSOUED :

Draine la partie Est de la plaine et le massif calcaire du Sud. Son écoulement est lié aux précipitations, notamment orageuses, qui coïncident avec la fin du printemps et de l'été, aucune mesure de débit n'a été enregistrée.

Oued ZENAD :

Il prend son origine au niveau du Kef Tnoukla, puis il coule le long de la plaine et se joint à l'Ouest de l'oued EL MA LASSOUED.

Cet oued contribue à l'alimentation de la nappe, mais la nappe ne le soutient jamais, vu l'intensité des captages dans le secteur. Aucune information sur les débits.

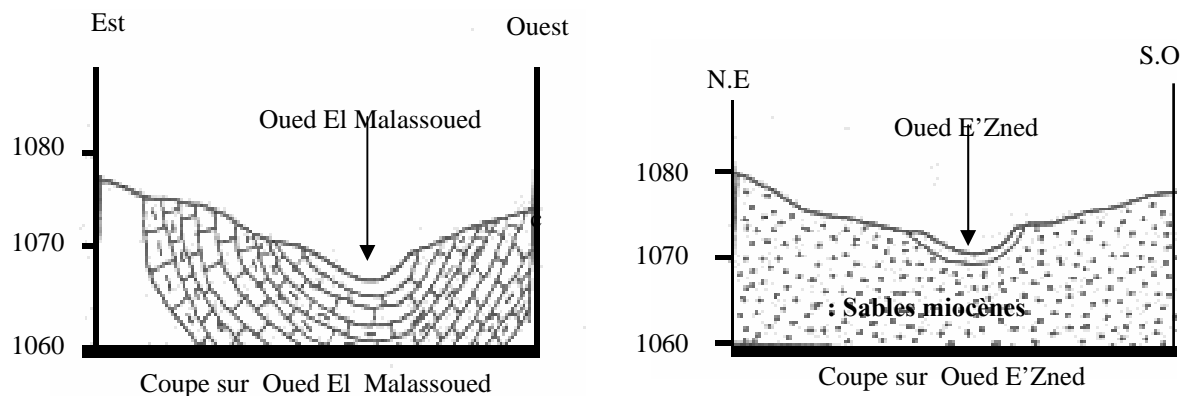


Fig. 16- Coupes géologiques schématiques sur oued El Malasouad et E'Zned

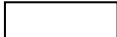

Oued EL GOUSSA :

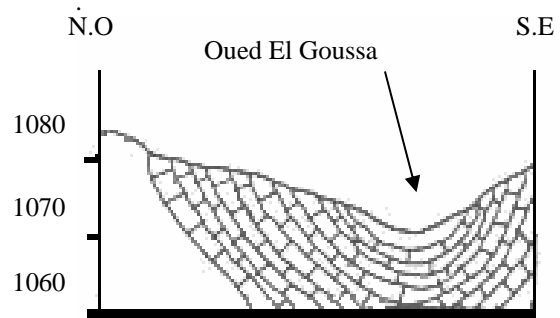
C'est le plus important, avec une longueur de 28,2 km. Il draine toute la partie ouest du bassin versant, avec un affluent tertiaire, l'oued Kriz qui coule pendant une partie de l'année à la suite des précipitations solides (neige) sur le massif du Dj. Doukkan



Fig. 16.1- Photographie de l'oued El Goussa à El Goussa. Rouabhia 06.2004

Les calcaires en cet endroit sont sans intérêt hydrogéologique, les puits creusés ont été négatifs.

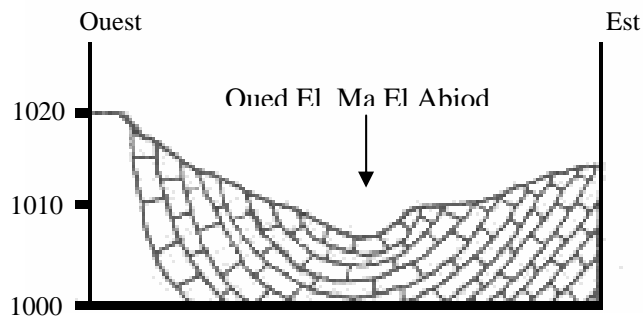
-  : Quaternaire, Gravier et alluvions
-  : Calcaires Maestrichtien



Coupe sur Oued El Goussa en aval

Oued EL MA EL ABIOD :

Il a un écoulement pérenne, il est soutenu par le système aquifère de la plaine, il prend naissance à deux kilomètres en amont de la ville. Il collecte les eaux de tous les autres oueds.



Coupe sur Oued El Ma El Abiod

Tab. 16. 2- Coupes géologiques schématiques sur oued El Goussa et el ma El Abiod

Tous les affluents ont un écoulement temporaire très limité, à la suite de fortes précipitations orageuses. Il est à signaler l'absence de mesures sur ces oueds. L'écoulement du système hydrographique se fait du Nord vers le Sud, caractère typique des oueds de l'Atlas saharien. L'absence d'écoulement est presque totale, cependant l'Oued Koriz coule sous l'effet de la neige, cet écoulement se perd malgré tout en aval dans les alluvions quaternaires, après une distance relativement courte.

En absence de données hydrométriques, il est à signaler, par suite de nos observations de terrain, que les crues n'ont pas lieu avec la saison humide, mais à la suite d'orages à la fin du printemps et au début de l'automne (septembre). A titre indicatif, le tableau qui suit, présente les seules mesures de débits de l'oued El Ma El Abiod (services ANRH Tébessa). [Débits en L/s]

Années	74/75	75/76	76/77	77/78	78/79	79/80	80/81	81/82	82/83	82/84	84/85	85/86
Mo.Ann	16.2	9.5	6.75	10.6	10.9	62.7	55	10.05	6.10	5.4	3.2	4.00

Tab. 12.1 – les seuls débits enregistrés sur l'Oued El Ma El Abiod (1974 – 1986)



Fig. 16.3- LA PLAIN D'EL MA EL ABIOD. VUE SATELLITAIRE septembre 2005. (Source Google Earth)

***HYDROGEOLOGIE DU SYSTEME
AQUIFERE DE LA PLAINE
D'EL MA EL ABIOD***

A- GEOMETRIE DE L'AQUIFERE

1. Introduction

En 1970, la société TRANSAKT GEOMETAL a entrepris une campagne géophysique par prospection électrique, couvrant une superficie de 420 km², représentée par : 315 systèmes électriques (SE) en AB = 2000m et 120 SE en AB = 6000m. (fig.17)

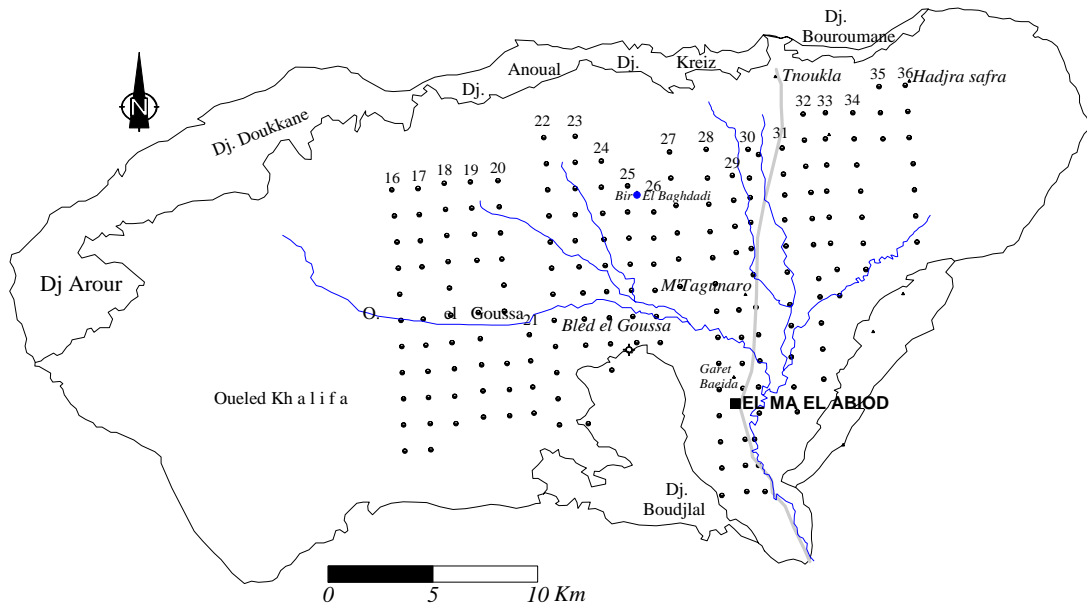


Fig. 17– Carte de position des sondages électriques

Sur la base des résultats de mesures paramétriques en comparaison avec les coupes stratigraphiques des forages situés dans le même périmètre, les plages concernant les différentes formations ont été déterminées :

- Alluvions, et formations quaternaires : 20 à 150 Ω m.
- Argiles : 2 à 15 Ω m.
- Argiles sableuses : 20 à 60 Ω m.
- Sables et graviers : 50 à 250 Ω m.
- Grès ou calcaires : plus de 200 Ω m.

Les valeurs de résistivité des formations décrites, ne sont pas toujours vraies, les calcaires fissurés se manifestent par la même résistivité que les grès, et les formations altérées disposent généralement d'une résistivité égale à celle des sables ou des graviers.

Cinq profils géoélectriques, ont été établis pour répondre à cette question :

2. Les Profils Géoélectriques

Les profils géoélectriques ont été réalisés à partir des profils géophysiques et suivant l'alignement des forages hydrogéologiques

2.1. Coupe transversale I (Nord-Sud) Fig.18

Traversée par les forages M₇, M₅, M₄, M₁₅ la coupe est représentée par quatre horizons pratiquement homogènes, de résistivités variables, sauf le dernier horizon. De part sa faible

résistivité (3 à 7 Ω m), il constitue un substratum conducteur, au contraire des horizons supérieurs qui sont résistants.

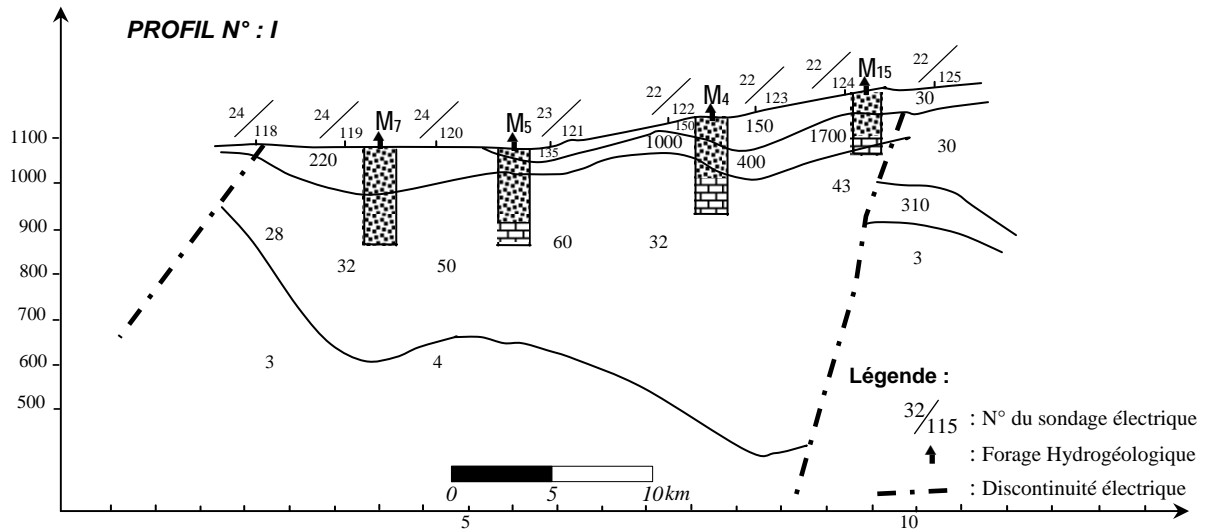


Fig. 18 – Coupe géoélectrique transversale I. passant par les forages M₇, M₅, M₄, et M₁₅.

Le premier horizon d’une puissance maximale de 85m n’est pas continu au long du profil. Sa résistivité varie de 90 Ω m à 150 Ω m. Cette variation s’explique par l’hétérogénéité dans la composante de la couche géologique. La lecture des logs stratigraphiques fait ressortir la variation de ces différents faciès géologiques, où on a une alternance de couches argileuses, de sables gros à fins avec graviers et argiles sableuses. La variation des épaisseurs de ces couches fait augmenter ou diminuer la résistivité de cet horizon, ce qui explique les résultats enregistrés par la prospection électrique.

Le deuxième horizon, continu le long du profil, est représenté par des résistivités allant de 220 Ω m pour atteindre 1700 Ω m, son épaisseur varie de 35m à 120m. La corrélation stratigraphique des forages avec les résistivités obtenues, exprime bien les résultats enregistrés. La formation rencontrée dans ce cas précis est représentée par des grès consolidés.

Au troisième horizon résistant, une diminution de la résistivité est observée, due à la variation lithologique des couches. En effet, on note la présence de deux formations géologiques distinctes ; il s’agit des argiles sableuses du Miocène et des calcaires marneux du Maestrichtien. Les résistivités obtenues corrélées à la stratigraphie des forages sont analogues, le tableau suivant schématise cette similitude :

Forages	Lithologie	Résistivité (P. électrique)
M₄	0 – 87m : argiles et argiles sableuses	0 – 50m : R= 150 Ω m
	87- 150m : sables argileux avec passées argileuses	50-100m : R= 400 Ω m
	150-164m : sables moyens	>100m : R= 32 Ω m
M₅	0 - 29 : alternance d’argile et de grès	00-25m : R= 135 Ω m
	29 – 61m : sables argileux et grès	25 – 65m : R=330 Ω m
	61 –156m : alternance d’argile et de sable	>65m :R= 60 Ω m

Tab.13- Lithologie et résistivités des forages M₄ et M₅

2.2. Coupe transversale II. (Nord-Sud) Fig.18.1

La coupe est traversée par trois forages M_{10} , M_9 , M_6 . Elle est caractérisée par trois horizons discontinus et hétérogènes.

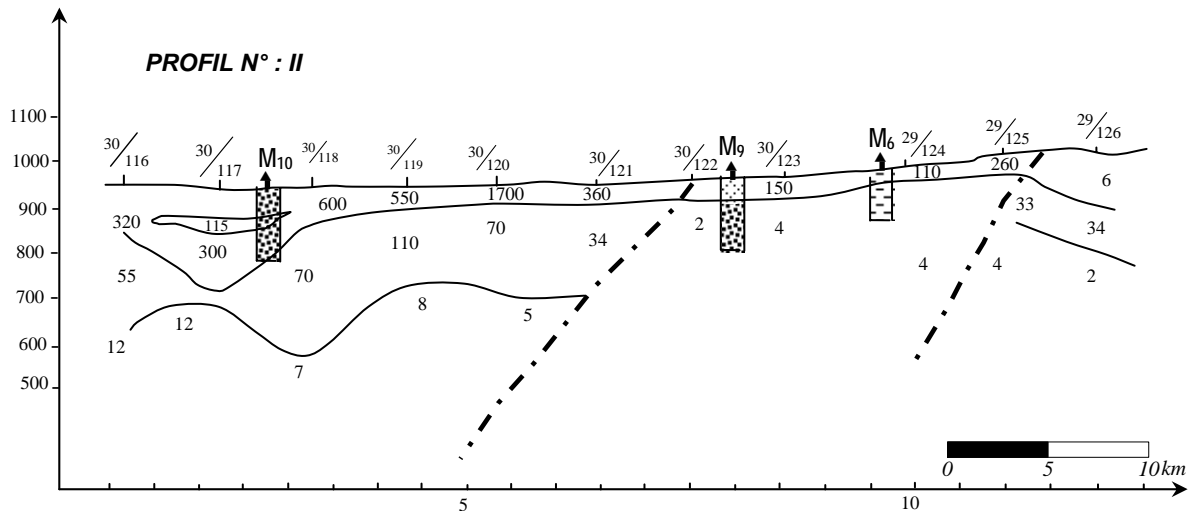


Fig. 18.1 – Coupe géoélectrique transversale II. Passant par les forages M_{10} , M_9 , et M_6 .

Le premier horizon est composé par une formation résistante dont la résistivité varie de 110 à 600 Ω m avec une épaisseur assez régulière sur tout le long du profil, égale à 85m. Cependant, au niveau du flanc Nord, le profil a tendance à se transformer en une structure bombée (allure synclinale) avec une épaisseur de 175m.

Le deuxième horizon, résistant, est continu sur tout le long du profil. Il disparaît en plein milieu de la zone étudiée et sur son flanc sud. Il est remplacé par un horizon conducteur, dont les résistivités vont de 50 à 110 Ω m et une épaisseur de 200m.

Le troisième horizon, conducteur, constitue le mur de ces formations géologiques. Il est représenté par des résistivités qui varient de 2 à 16 Ω m. Ce profil est également marqué par deux discontinuités électriques mettant en relief la présence de deux failles.

Le tableau qui suit donne une corrélation entre la lithologie et la prospection électrique.

Forages	Lithologie	Résistivité (P. électrique)
M_6	0 – 16m : gravier, calcaire argileux	0 – 20m : R= 110 Ω m
	16- 20m : argile et graviers	>20m : R= 160 Ω m
M_9	0 – 5m : Argiles	00-55m : R= 140 Ω m
	05 – 45m : Argile, sables argileux	>55m : R= 60 Ω m
M_{10}	0 – 152m : Grès avec variation de faciès dépendant de la grosseur des graviers et une faible présence d'argiles.	00-150m : R= 140 Ω m
		150 - 350m : :R= 70 Ω m

Tab.14- Lithologie et résistivités des forages M_6 , M_9 et M_{10}

2.3 Coupe transversale III. (Nord-Sud) Fig.:18.2

Cette coupe présente les mêmes caractéristiques que la coupe II, elle est traversée par les forages M_1 , P_{23} , M_6 . La corrélation entre la géologie et les opérations de sondage est présentée dans le tableau qui suit :

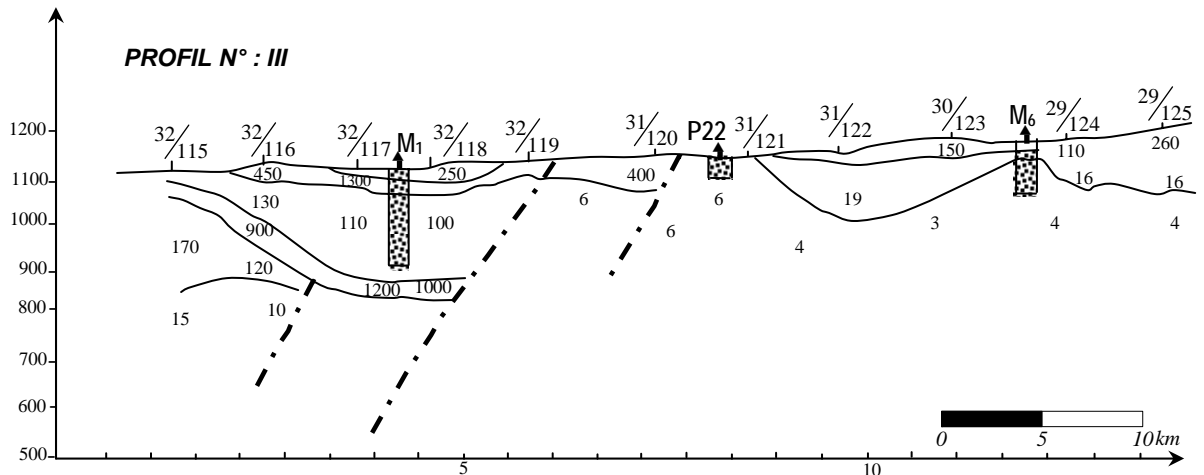


Fig. 18.2 – Coupe géoélectrique transversale III. Passant par les forages M₁, P₂₃, et M₆.

Forages	Lithologie	Résistivité (P. électrique)
<i>M₁</i>	0 – 125m : sables argileux, les grains sont plus fins au niveau du toit.	0 – 55m : R= 250 à 1500Ωm 55 –285m : R= 100Ωm 285 - 325m : R= 1000Ωm >325m : R= 10Ωm
	125- 200m : marnes grises	
<i>P₂₃</i>	0 – 7m : Argiles sableuses	00- 40m : R= 19 -60Ωm
	07 – 41m : Sable à grains moyen.	>40m :R= 6Ωm
<i>M₆</i>	0 – 16m : Gravier, calcaire argileux graviers	00-20m : R= 110Ωm
	16 – 20m : argiles et graviers	>20m :R= 16Ωm

Tab.15 Lithologie et résistivités des forages M₁, P₂₃ et M₆

2.4. Coupe transversale IV. (sud-ouest - nord-est) Fig.:18.3

Cette coupe est traversée par quatre forages, elle est caractérisée par trois horizons bien distincts dont deux résistants et l'autre conducteur :

Le premier horizon est représenté par des formations résistantes dont la résistivité varie de 250 à 650Ωm au niveau du centre du profil, et par des résistivités hétérogènes au flanc Nord (75Ωm < R < 1500Ωm). L'épaisseur de cet horizon est estimée à 80m au centre et à 170m sur les flancs.

Le deuxième horizon, également résistant, est traversé par un seul forage (M₁₃). Sa résistivité varie de 280Ωm à 120Ωm, l'importance de cette variation s'explique par l'hétérogénéité dans la composition lithologique de cet horizon. Son épaisseur est de l'ordre de 300m.

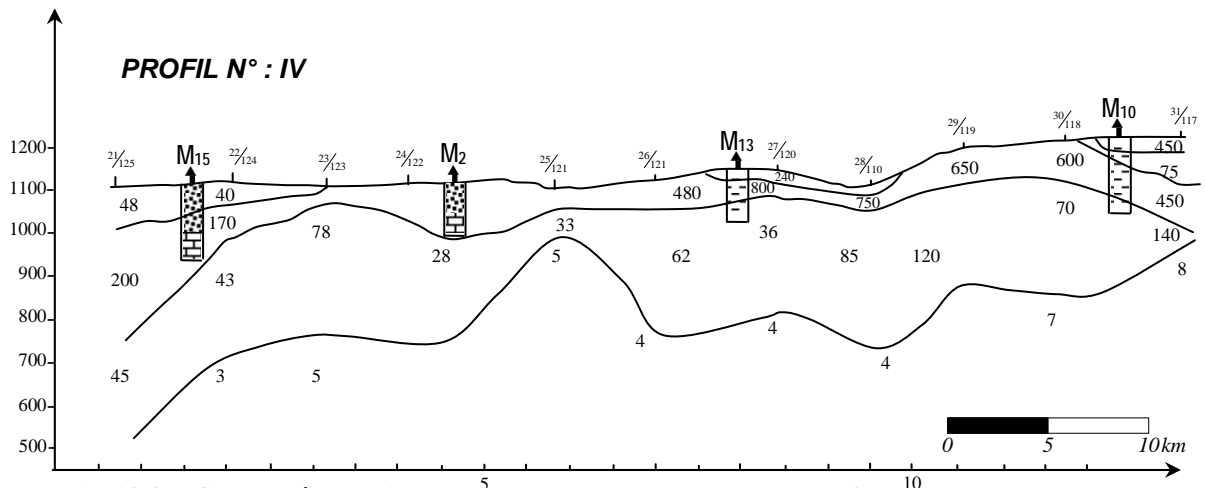


Fig.18.3 – Coupe géoélectrique transversale IV. Passant par les forages M₁, P₂₃, et M₆.

Le troisième horizon constitue le substratum. Il est caractérisé par une couche conductrice de résistivités variables de 30Ωm à 10Ωm. La corrélation est présentée dans le tableau qui suit :

Forage	Lithologie	Résistivité (Prosp. électrique)
M_{13}	0 – 30m : sables fins et moyens.	0 – 30m : R= 240Ωm
	30 - 70m : grès	30 – 70m : R= 800Ωm
	70- 88m : argile sableuse	70 - 270m : R= 36Ωm
	88 - 100m : marnes grises	>270m : R= 40Ωm
M_2	0 – 77,5m : Sable quartzeux avec parfois des passages argileux	00- 120m : R= 200Ωm
	77,5 – 110m :marno-calcaires et calcaire-marneux.	
M_{10}	0 – 152m : grès avec une variation de faciès, qui dépend de la grosseur des graviers, et faible présence d'argile.	00-30m : R= 400Ωm 30 - 110m : R= 75Ωm 110 - 260m : R= 450Ωm
	0 – 16m : argiles avec graviers.	
	16 - 25m : marnes bariolées	
M_{15}	25- 48m : sable gros à moyen	00-70m : R= 90Ωm
	48 - 55m : marnes verdâtres	>90m : R= 200Ωm
	55- 70m : sables grossiers	
	70 - 142m : calcaires blancs friables avec parfois des passées marneuses	

Tab.16- Lithologie et résistivités des forages M_{12} , M_{13} , M_2 , M_{10} et M_{15}

Ainsi nous constatons une disparition des discontinuités électriques, ce qui suppose que le bassin d'El Ma El Abiod est recoupé par deux failles longitudinales juste sur les limites Nord et Sud, la seconde remarque concerne l'inexistence de certaines couches apparentes sur les coupes transversales et l'homogénéité des formations existantes.

2.5. Coupe transversale V. (sud-ouest - nord-est) Fig.:18.4

Ce profil est également marqué par trois horizons : deux résistants et un conducteur. Leurs résistivités et leurs épaisseurs varient comme suit :

Le premier horizon : R = 90 à 1300Ωm et H = 60 à 150m

Le deuxième horizon : R = 50 à 150Ωm et H = 250 à 450m

Le troisième horizon : R = 3 à 10Ωm, l'épaisseur est indéterminée.

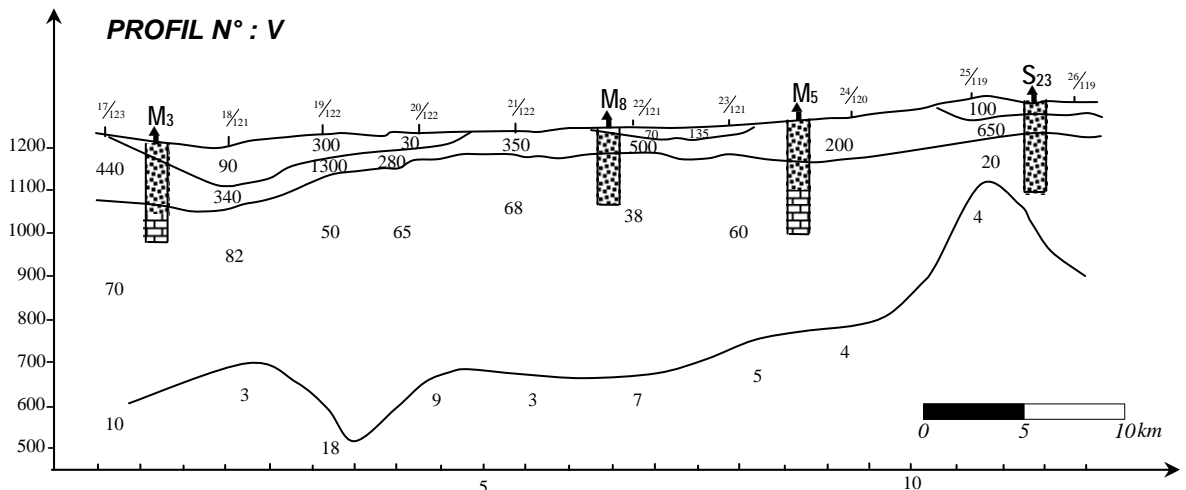


Fig. 18.4 – Coupe géoélectrique transversale V. Passant par les forages M_3 , M_8 , M_5 et S_{23} .

3. Conclusion

La synthèse des données géophysiques en corrélation avec la géologie a permis de conclure ce qui suit :

- les différents horizons géo-électriques recourent clairement les formations lithologiques rencontrées par les forages.
- L'analyse des coupes a mis en évidence la présence de deux grandes failles longitudinales qui limitent au nord et au sud une structure synclinale.
- L'interprétation globale a permis de constater la présence de trois nappes aquifères superposées :
 - la première contenue dans les sables miocènes
 - la deuxième contenue dans les grès
 - la troisième dans les argiles sableuses d'âge Miocène

4. Les Cartes isopaches

La représentation en courbes isopaches des trois horizons aquifères précédemment définis ;

- Les sables du Miocène : $R = 50$ à $250\Omega m$
- Les grès du Miocène : $R > 250m$
- Les argiles sableuses : $R = 20$ à $50m$.

Déterminés au niveau de chaque sondage électrique a permis de voir la répartition des horizons.

4.1. Carte d'égales épaisseurs des sables. Fig. 18.5

L'examen de cette carte révèle la présence de deux zones. La première est de faible extension, située à l'Ouest, son épaisseur n'excède pas 65m. La deuxième est assez importante, elle occupe la partie centrale, avec des épaisseurs pouvant atteindre 100m voire 145m.

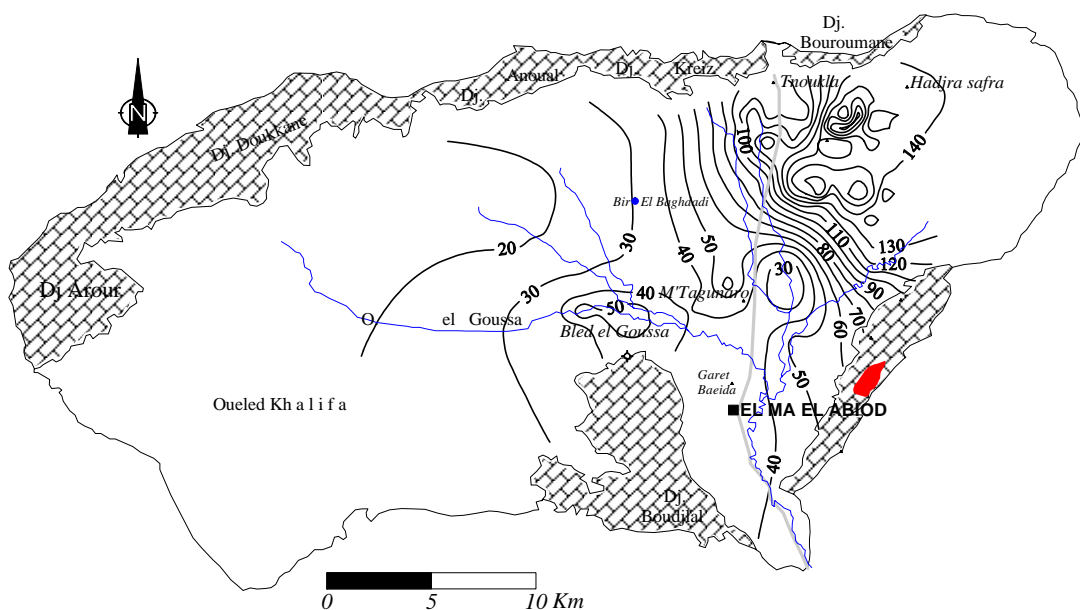


Fig. 18.5 – Carte d'égale épaisseur des sables

4.2. Carte d'égal épaisseur des grès Fig. :18.6

Deux zones favorables d'extension assez importante sont localisées à l'Est et à l'Ouest de la plaine. A l'Est, l'épaisseur peut atteindre les 90m alors qu'à l'Ouest elle est de 75m au maximum.

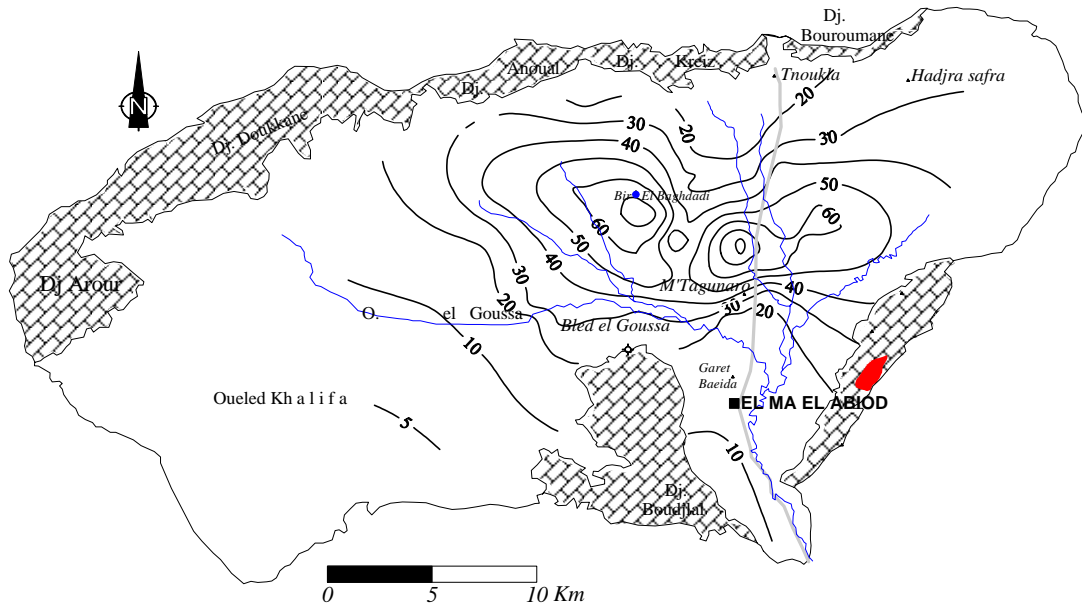


Fig. 18.6– Carte d'égal épaisseur des Grès

4.3. Carte d'égal épaisseur des argiles sableuses Fig. :18.7

Deux zones d'extension importante peuvent être aussi individualisées : la zone ouest (Bled El Goussa) où l'épaisseur des argiles sableuses peut atteindre 290m, et la zone est (Draa El Hrakel) dont l'épaisseur n'excède pas 270m.

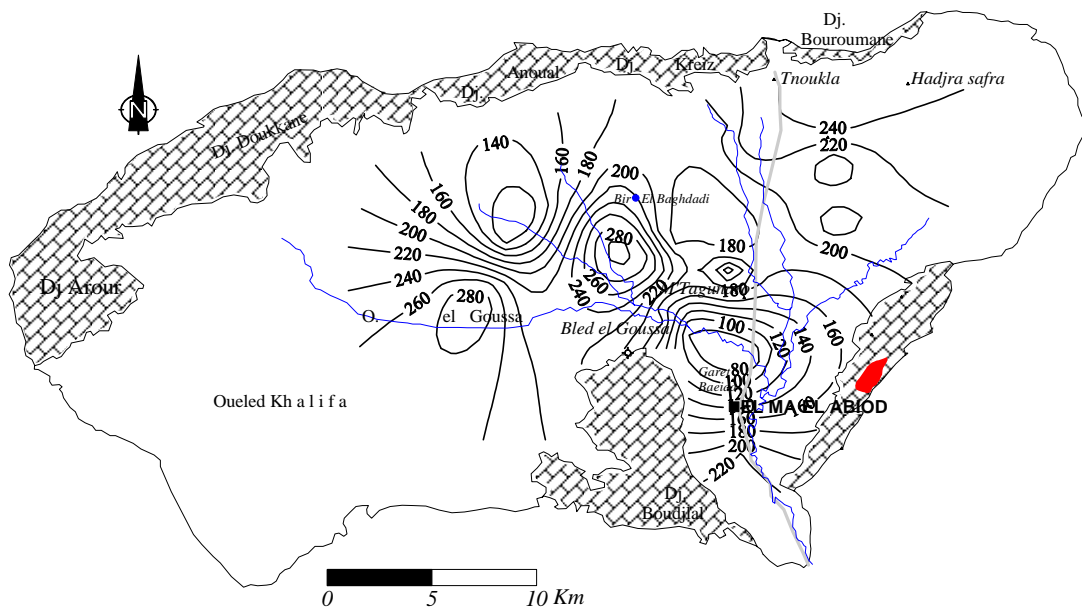


Fig.18.7– Carte d'égal épaisseur des Argiles sableuses

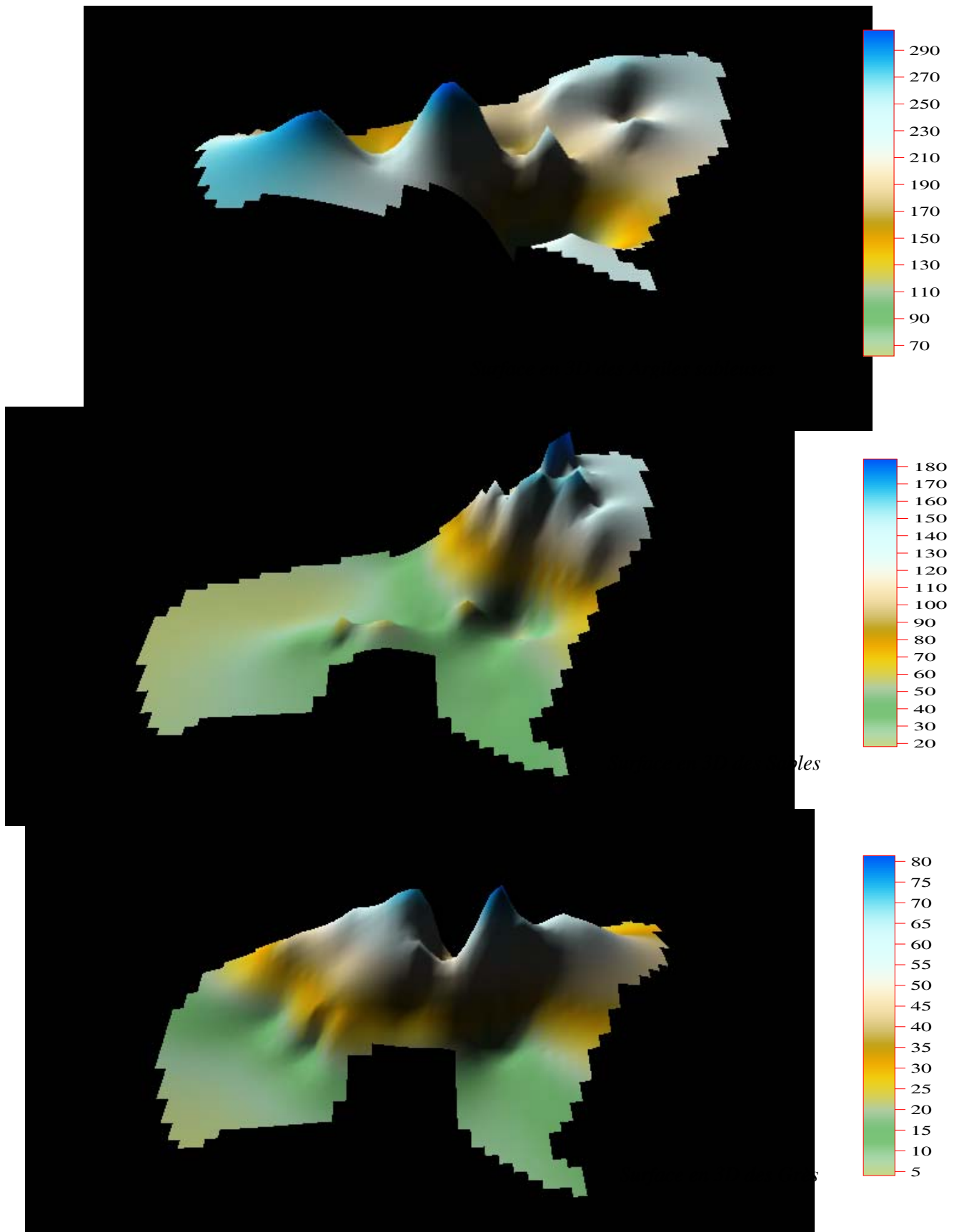


Fig.18.8– Représentation en 3D des horizons aquifères.

5. Conclusion

En somme, à travers l'étude corrélatrice de la prospection électrique avec la géologie, on constate une analogie des résultats enregistrés.

Les horizons géo-électriques recourent clairement les formations lithologiques rencontrées par les forages.

L'examen des coupes a mis en évidence la présence de deux grandes failles longitudinales qui limitent au Nord et au Sud une structure synclinale.

L'interprétation révèle la présence de trois nappes aquifères superposées :

- une première formée de sables à grains fins et moyens
- une deuxième formée de grès
- La troisième formée d'argiles sableuses.

La répartition des forages favorables réalisés dans la plaine confirme les constatations qui ont été faites.

B- HYDROGEOLOGIE

1. INTRODUCTION

Le système aquifère de la plaine d'EL Ma El Abiod est encaissé dans un bassin versant d'effondrement d'âge mio-pliocène, dont la structure lithologique horizontale et verticale est peu variée.

Cette structure est caractérisée par une superposition, de bas en haut, de marnes, de calcaires localisés, de grès et de sables qui affleurent largement à l'Est (essentiellement au niveau de la bordure Nord-Est). Ailleurs, les horizons supérieurs sont argilo-limoneux (centre de la plaine) et constitués de galets et graviers calcaires (bordures Nord et Sud).

Les formations calcaires affleurant au nord et au sud plongent en direction de la plaine sous le remplissage quaternaire.

2. STRUCTURE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DU SYSTEME

La structure générale de la plaine d'El MA EL Abiod montre deux familles d'unités aquifères de profondeurs différentes.

La première, de faible profondeur et très étendue, se rencontre dans les formations alluviales récentes ; constituées d'argiles remaniées avec du sable et des cailloutis.

Localement, une formation de calcaires de faible profondeur (Oglat Chaachaa) été exploitée par deux puits actuellement à sec.

La deuxième se trouve dans les formations miocènes, grès, sables et graviers à plus grandes profondeurs ; elle est exploitée par une dizaine de forage et une centaine de puits. Les deux nappes sont libres, mais la nappe miocène devient légèrement captive plus à l'Est, au niveau du forage AT1.

2.1. LA NAPPE ALLUVIALE

Elle se développe dans les formations récentes et actuelles, possède une étendue considérable. Elle se localise essentiellement près des bordures de la plaine d'El MA EL Abiod.

Plusieurs puits ont été creusés (depuis longtemps) leurs profondeurs n'excèdent pas en générale quelques mètres, avec un débit moyen de l'ordre de 2 l/s. Ils sont à sec à l'exception de quelque puits au Nord dans lesquels la nappe affleure à la suite des précipitations hivernales (surtout la neige)

La variation du niveau piézométrique de cette nappe dépasse le mètre. D'ailleurs quelques puits de faible profondeur tarissent en été. Elle est libre sur toute son étendue, l'épaisseur des alluvions varie du Nord vers le Sud, avec un maximum au Sud (forage M6, 15m). Elle disparaît dans les horizons miocènes et en général sur presque toute l'étendue de la nappe miocène. Elle participe alors à l'alimentation de cette dernière par infiltration en profondeur.

La nature des lithofaciès argilo-limoneux a favorisé cette percolation sur un substratum imperméable constitué soit d'argile (au milieu de la plaine), ou de marnes emscheriennes (forage M6), soit de calcaires près du village d'El MA EL Abiod.

2.2. LA NAPPE MIOCENE

2.2.1. Description :

C'est à une date récente (1971) qu'une étude géophysique a confirmée l'existence d'une nappe miocène profonde. Tous les forages exploitent la nappe miocène et sont compris entre les deux failles F_1 et F_2 WSW-ENE.

Les sondages d'eau qui ont été creusés en dehors de cette zone, de part et d'autre de ces failles, se sont révélés négatifs, malgré la présence d'horizons sableux.

La campagne menée en 1973 dans le but de connaître l'extension de la nappe (7 sondages stériles), a amené à la conclusion que la nappe miocène s'étend dans les limites précises des failles F_1 et F_3 à l'ouest et F_1 , F_2 et F_3 à l'Est.

A l'Ouest de la route nationale Tébessa-El MA EL Abiod, la nappe miocène se situe au milieu de la plaine, à l'est elle coïncide avec les formations miocènes affleurantes (grès et sables).

Les cassures dans l'écorce d'âge mio-quadernaire, sont donc à l'origine de la formation de la nappe miocène, qui est d'âge post miocène. Ces déchirures ont favorisé le remplissage continental du fossé d'effondrement de la plaine d'El Ma El Abiod (qui vient en transgression sur les formations antérieures d'âge secondaire), en donnant naissance à la structure actuelle de la nappe miocène. La figure (19 et 19.1) montre l'extension de cette nappe qui couvre une superficie considérable, ainsi qu'une importante puissance. Sur le tableau 17 nous pouvons remarquer les débits des forages qu'ils l'exploitent.

L'alimentation de la nappe n'est pas assurée directement par les calcaires des bordures, excepté celles de la zone Nord-Est, où les sables butent directement contre les calcaires aptiens du Dj. Bouroumane. Le forage exploitant le versant nord de ce massif (forage de reconnaissance N° 509-9) a relevé l'existence des diaclases et fissures le long de sa colonne stratigraphique. Le second forage (509bis.206) marno-calcaires a donné un débit de 20l/s.

Ces observations permettent d'attribuer aux calcaires aptiens (Dj. Bouroumane), une fraction importante de l'eau transitant vers la nappe miocène. Ce massif ne présente aucun point d'eau au contact avec les formations miocènes.

Au Nord et au contact de ces calcaires avec les grès, émerge une importante source (Ain Bekkaria) d'un débit de l'ordre de 20l/s en moyenne, ce qui montre l'importance de la perméabilité de ces calcaires et leur coefficient d'infiltration.

Cette nappe miocène devient affleurante au Nord-est du village d'El Haouidjbet, où elle alimente les sources qui émergent le long du talus gréseux.

2.2.2. Géométrie des horizons de grès

Les coupes lithologiques des forages ayant traversé toute la puissance aquifère jusqu'au substratum imperméable montrent des niveaux de grès et de sables séparés par des lentilles d'argiles d'une épaisseur plus ou moins faible selon les forages (M_1 , M_4 , M_5 , et M_7) ; ce qui laisse à dire que cette séquence sédimentaire n'affecte pas la continuité hydraulique de la nappe miocène, qui constitue un horizon aquifère unique.

L'épaisseur des couches d'argiles ne dépasse pas les 15 mètres au maximum forage (M₅), de quelques mètres aux forages (M₁, M₂, et M₄) et elle disparaît dans les forages (M₃, et M₈) ce qui traduit la variabilité et la discontinuité de cette séquence sédimentaire argileuse dans l'espace de l'horizon aquifère miocène.

2.2.3. Epaisseur du niveau miocène

La répartition spatiale de l'épaisseur de la nappe miocène est établie d'après les forages existant dans la plaine et traversant l'horizon aquifère gréseux jusqu'au substratum imperméable constitué par des marnes emscheriennes.

Cette répartition spatiale varie, depuis un maximum à l'Ouest avec 178m forage (M₇), jusqu'à 110 mètres au minimum. A l'est au niveau de l'école de Tnoukla, la couche aquifère atteint la valeur de 90 mètres (forage M₁₀), par contre elle diminue progressivement si on se déplace du nord vers le sud avec 31mètres (forage M₉), (M'Taguinaro) ce qui s'explique par un soulèvement tectonique progressif (faille F₂) des marnes emscheriennes. Ce forage montre aussi un passage sédimentaire vers la nappe alluviale. Si on se déplace vers le sud les niveaux gréseux disparaissent, et on ne trouve que les formations quaternaires qui viennent directement en discordance sur les formations emscheriennes ou calcaires (forage M₆).

Le forage (M₁₂) se situe au Nord Est du (M₉) à un niveau statique qui ne dépasse pas les 06 mètres de profondeur ; cette diminution considérable de la profondeur de la nappe miocène se poursuit et celle-ci disparaît au niveau de Bir El Ma El Lssoued, localité située à la limite de la faille. Les puits n° 10 et n° 11 ont une profondeur de 05mètres dans les alluvions, les marnes emscheriennes forment leurs substratum.

Le tableau ci-après donne les épaisseurs des forages

Forages	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M ₈	M ₉	M ₁₀	M ₁₂	AT ₁
Profondeur en (m)	125	110	200	179	213	100	212	218	150	152	45,7	164
Epaisseur des calcaires (m)	Abs	21	67	6	40	Abs	Abs	3	Abs	Abs	Abs	Abs
Epai. des form. miocène (m)	125	86	122	155	143	A	212	203	40	152	36	100
Epai. des forma. quaternaires	Abs	2.5	11	09	13	30	Abs	12	05	Abs	7.3	10
Epai. de la hauteur saturée	91	75	111	136	135	14	172	166	31	37	38	100
Débit (Q) l/s	33	30		30	40		40	40	06	09		

Tab. 17- Epaisseurs et débits des forages

2.2.4. Les calcaires de la plaine d'El Ma El Abiod

Les coupes hydrogéologiques des forages d'eau, effectués à l'Ouest de la route Tébessa- El Ma El Abiod, ont traversé les formations calcaires situées directement en-dessous du remplissage miocène. Ces calcaires disparaissent à l'Est, où les formations miocènes viennent en discordance sur les marnes emscheriennes.

Les forages ont montré que ces calcaires présentent des cassures conchoïdales colmatées par de la calcite recristallisée (forage M₂) d'une part et des calcaires blancs ou gris durs d'autre part (M₃, M₇, et M₈). Tous les forages ont été rebouchés aux niveaux supérieurs des calcaires.

Les puits creusés dans les calcaires affleurant au niveau de la plaine à Oglet Chaachaa et près du village d'El Ma El Abiod, ont montré la très faible perméabilité de ces calcaires qui ne présentent aucun intérêt hydraulique.

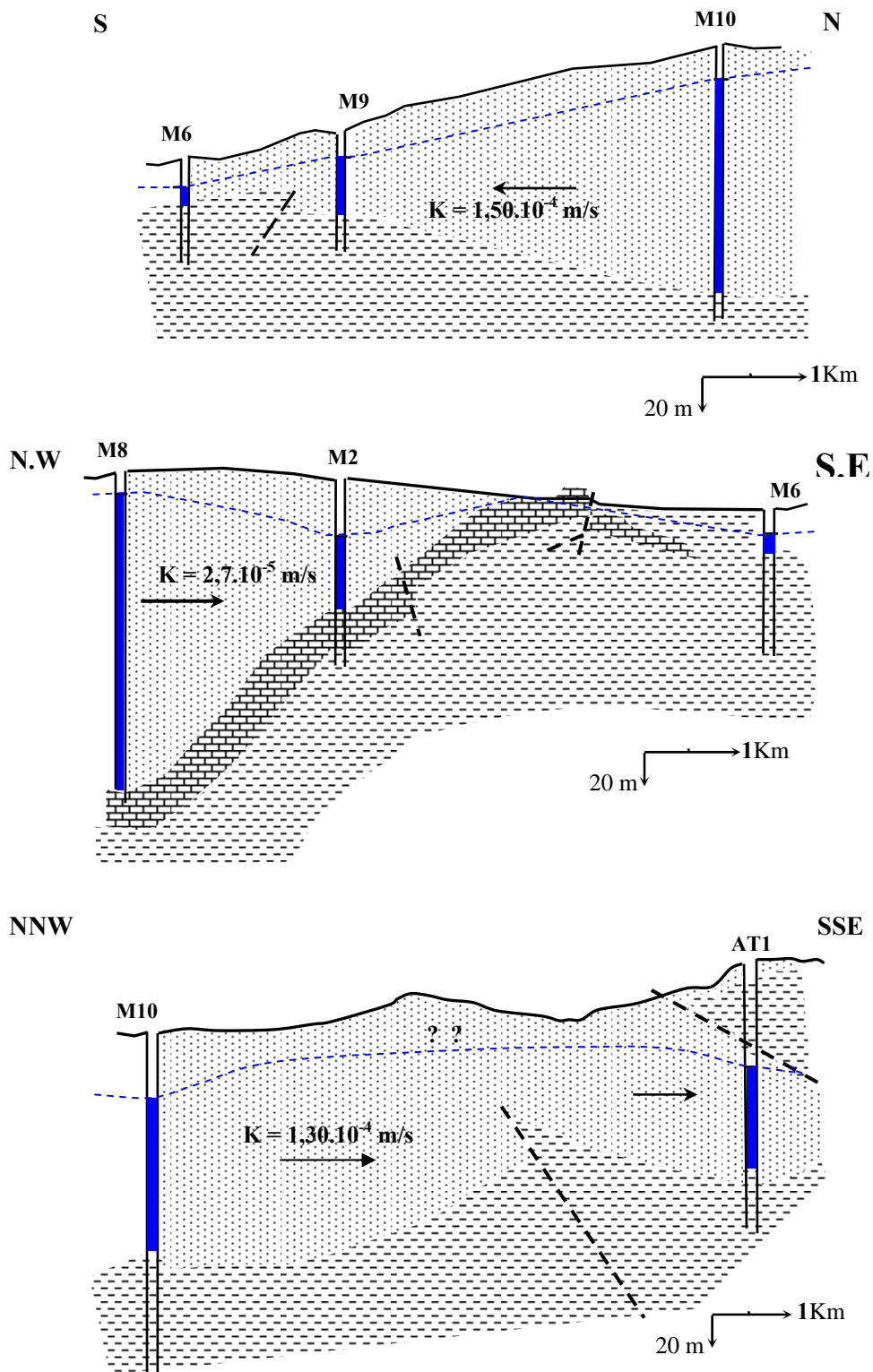
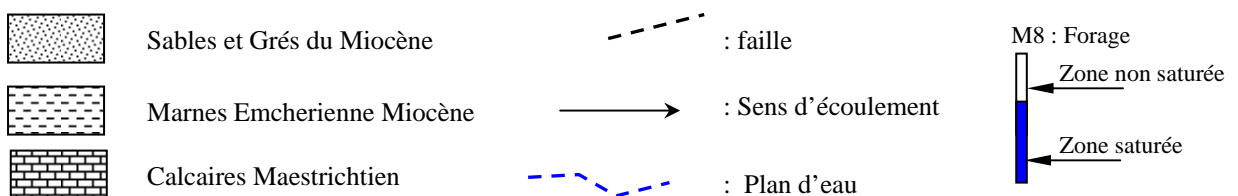


Fig. 19 - Coupes hydrogéologiques à travers la plaine d'El Ma El Abiod
(In Rouabhia 2001)



Les calcaires de la plaine d'El Ma El Abiod qui se situent au Sud ou au fond de la plaine ne sont pas perméables et sont sans intérêt hydrogéologique, même s'ils se trouvent alimentés par les grès miocènes (Oglet Chaachaa) ou par la nappe alluviale (en amont du village d'El Ma El Abiod).

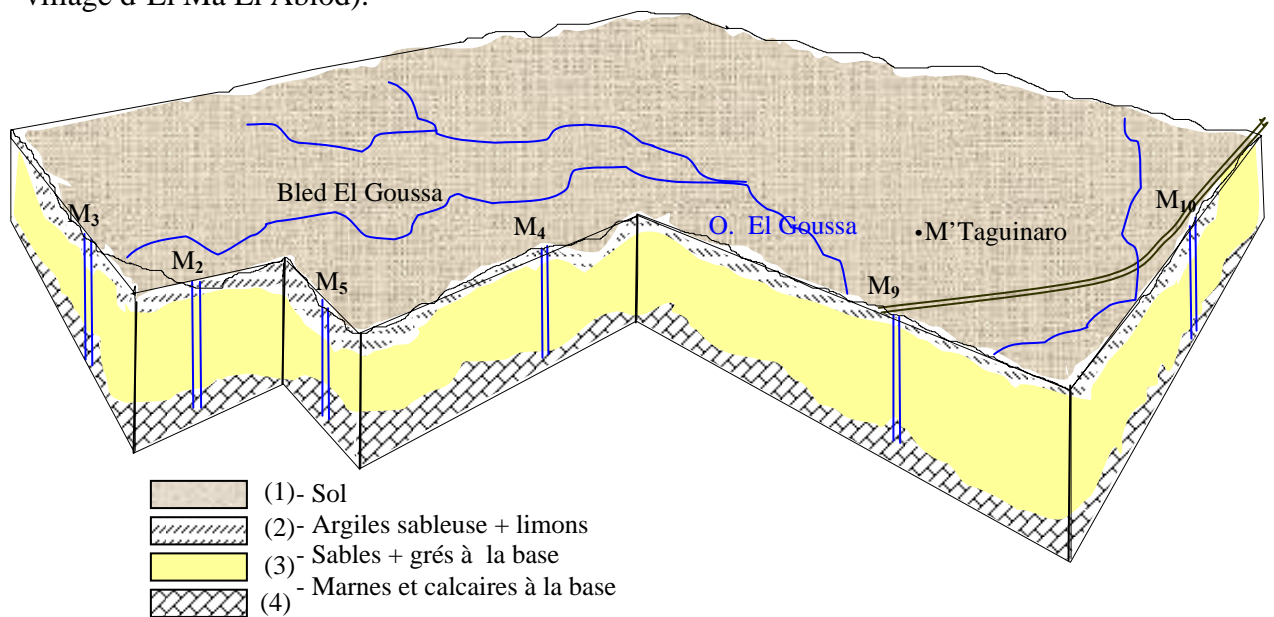


Fig. 19.1 - Structures géologique et hydrogéologique du système aquifère de la plaine d' d'El Ma El Abiod



Fig. 19.2- Carrière de sable abandonnée à T'noukla. Rouabhia 2005

3. CONDITIONS AUX LIMITES DU SYSTEME AQUIFERE

C'est pour comprendre le fonctionnement hydraulique (fig.20) qu'on va examiner les conditions aux limites de l'aquifère, ainsi que les relations entre les deux nappes, à partir principalement des observations sur terrain effectuées pendant, différentes périodes, lors des campagnes piézométriques.

3.1. Nappe alluviale :

Au Nord, la nappe alluviale vient en contact avec les calcaires d'âge secondaire qui constituent une limite perméable par leur nature et par le pendage plongeant de leurs couches vers la plaine.

Au Sud, en contact avec les formations calcaires, les eaux de précipitations atmosphériques de ce versant ruissellent en surface et alimentent en partie la nappe alluviale, en plus des pluies efficaces qui tombent directement sur son impluvium.

Les argiles et les marnes constituent en profondeur le substratum imperméable, de ce fait les eaux d'infiltration s'écoulent en aval en direction de la nappe miocène.

En aval de la plaine, cette nappe admet une limite de fuite vers l'oued El Ma El Abiod (village d' El Ma El Abiod).

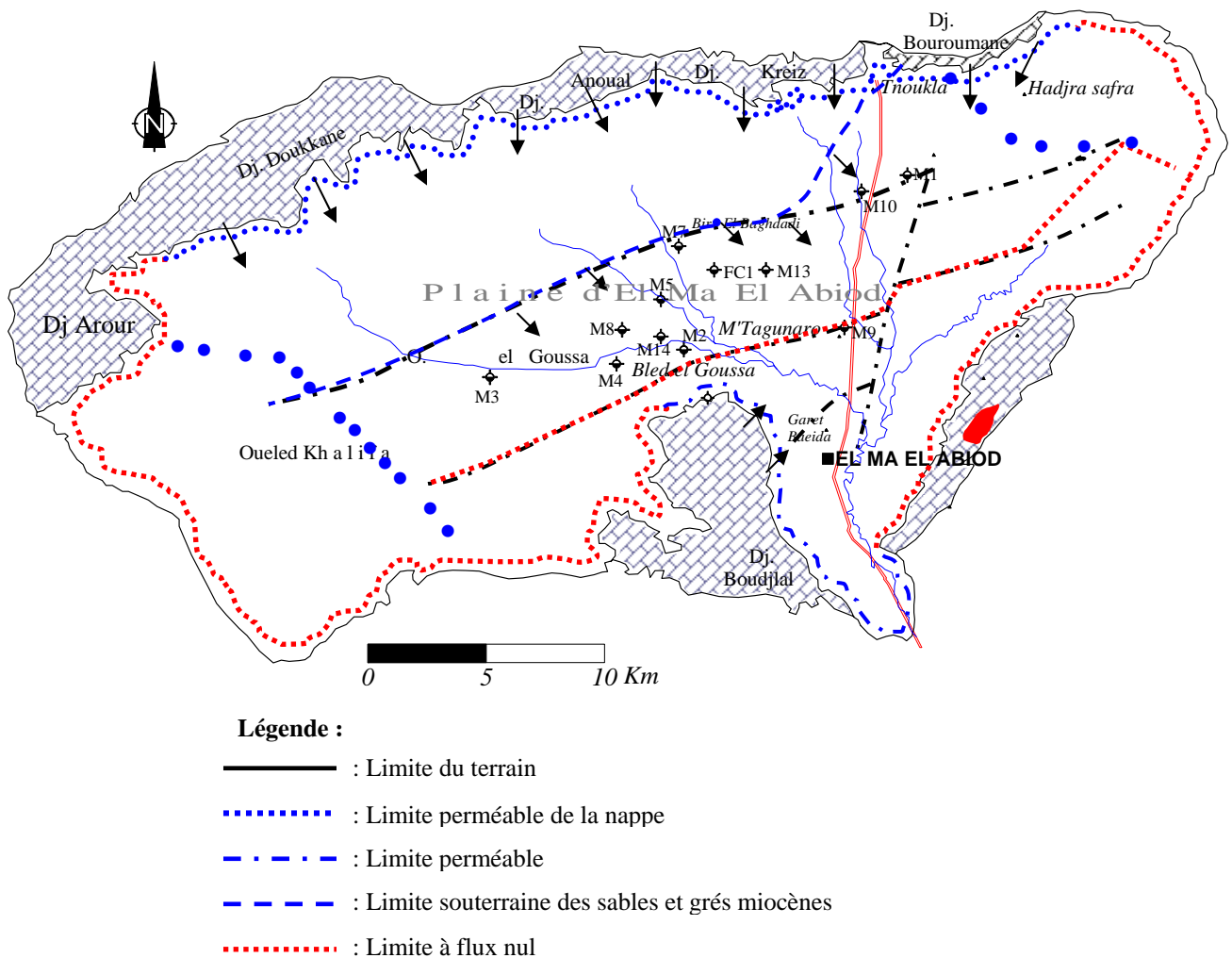


Fig. 20 – Carte des conditions aux limites du système aquifère d'El Ma El Abiod
- In Rouahia 2001 Modifiée -

3.2. Nappe miocène :

Elle est alimentée principalement à partir:

- du massif calcaire du Nord (Dj. Bouroumane) au niveau de Hdjar E'sefra au contact des grès miocènes, du fait que le pendage des couches calcaires est orienté vers la plaine.
- des précipitations tombant directement sur l'étendue des grès affleurant ; dans la zone Est et à l'Ouest.
- de la nappe alluviale lorsque les deux nappes sont en contact, le système de failles favorise la transition vers la nappe miocène.

A l'Ouest, se trouve le puits «Bir El Baghdadi », un puits très ancien (creusé avant 1957), implanté dans la nappe alluviale et situé sur la limite de la faille F₃ où le substratum est constitué par les marnes emcheriennes à 6,5m de profondeur. A une distance de 150m, se trouve le forage M₇, dans la nappe miocène avec un niveau piézométrique de 27m de profondeur. Les directions de l'écoulement (cartes piézométriques) se font de la nappe alluviale vers la nappe miocène, c'est-à-dire du nord vers le sud.

Ces observations confirment l'alimentation de la nappe miocène par la nappe alluviale dans la région Ouest. Au sud, cette nappe admet une limite de fuite vers la nappe alluviale.

4. ETUDE DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

4.1. La nappe alluviale

Aucune étude n'a été établie sur la nappe alluviale, les quelques essais par pompage effectués par Baali et Latrach en 1994 sur les puits ont donné une faible perméabilité de l'ordre de 10⁻⁶m/s, ce qui traduit la nature d'un lithofaciès argileux à argilo-limoneux.

Ces quelques valeurs de perméabilité ne concernent que la tranche supérieure et ne représentent pas toute l'épaisseur de l'aquifère.

4.2. La nappe miocène

La nappe miocène constitue la réserve d'eau principale de la région, les services de l'hydraulique de la wilaya se sont intéressés à l'exploitation de cette nappe depuis l'année 1970, ce dont témoigne la série de forages entrepris dans la plaine. Actuellement s'ajoutent les forages des fellahs qui, devant, l'insuffisance de la nappe alluviale, doivent trouver de nouveaux points d'eau.

Cette exploitation par forage n'a pas été complétée par la réalisation de piézomètres qui auraient permis de suivre l'évolution de la nappe, et déterminer notamment le coefficient d'emmagasinement.

4.3. Répartition des paramètres hydrodynamiques.

Le tableau ci-après donne les valeurs de la transmissivité et les perméabilités obtenues après l'interprétation des essais par pompages dans les forages exploitant la nappe miocène (extrait des fiches techniques auprès de la Direction de l'Hydraulique de la Wilaya de Tébessa).

Forages	Coordonnées			Transmissivité T en (m ² /s).10 ⁻²	Perméabilité K en (m/s) .10 ⁻⁴
	X	Y	Z		
M1	1000.525	235.000	1090	1.3	1.5
M2	992.975	229.100	1075	1.2	1.7
M3	986.425	228.175	1100	2.9	3.4
M4	990.700	228.625	1080	0.7	0.5
M5	992.200	230.800	1075	0.8	0.6
M7	992.800	232.600	1080	0.7	0.4
M8	990.890	229.775	1072	0.5	0.3
M9	998.400	229.850	1048	1.0	1.5
M10	998.975	234.450	1085	1.3	1.0
M13	995.750	231.800	1080	0.6	0.6
M14	992.200	229.550	1072	1.8	0.9
Fc1b	994.000	231.800	1085	0.4	0.6

Tab. 18- Quelques caractéristiques hydrodynamiques des forages.

4.3.1. Carte des Transmissivités:

Les plus grandes valeurs se situent dans les zones suivantes :

- Est (Draa El hrakel) ; les valeurs sont de l'ordre de $1,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.
- Ouest (El Goussa); dans cette zone les valeurs oscillent entre $0,5 \cdot 10^{-2}$ et $2,9 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$

La partie nord-ouest montre des valeurs moins importantes que les deux premières zones, les valeurs de la transmissivité varient entre $0,4 \cdot 10^{-2}$ et $0,7 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

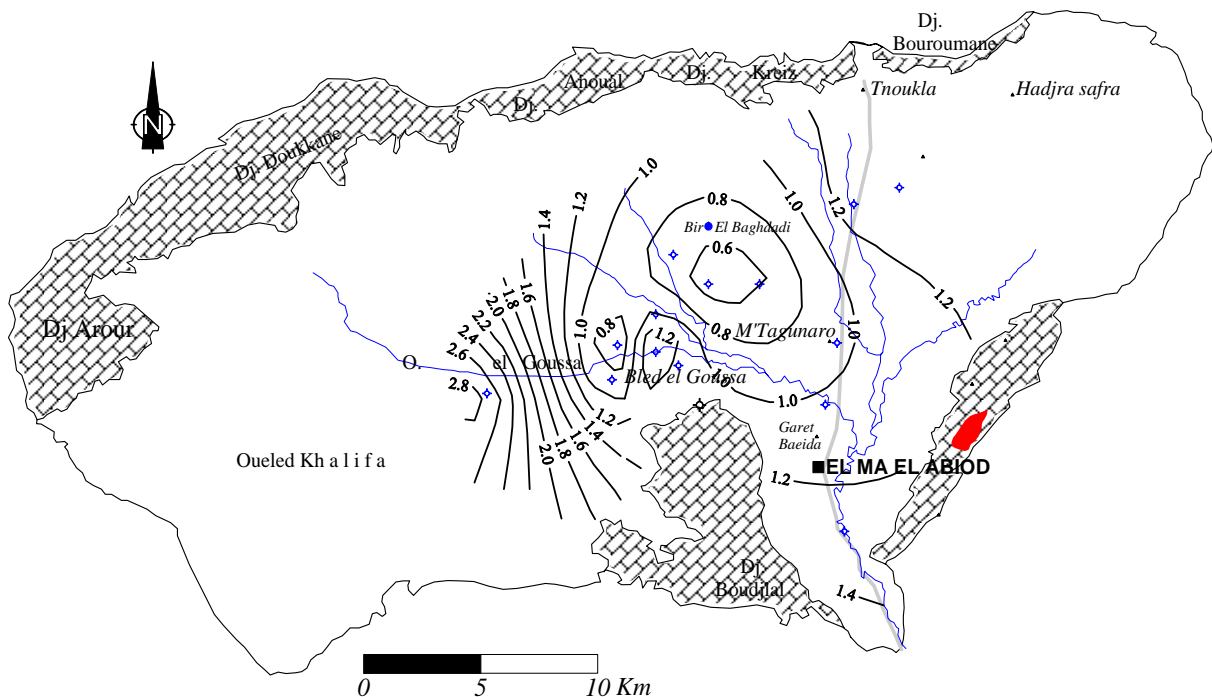


Fig.21 – Carte des transmissivités en $10^{-2}(\text{m}^2/\text{s})$

4.3.2. Carte des Perméabilités :

L'examen de cette carte fait ressortir deux zones importantes de point de vue de la perméabilité :

- La zone ouest (El Goussa) : où les valeurs varient entre $0,3 \cdot 10^{-4}$ et $3,4 \cdot 10^{-4}$ m/s.
- La zone Est (Draa El hrakel) ; où les valeurs oscillent entre $1,0 \cdot 10^{-4}$ Et $1,4 \cdot 10^{-4}$ m/s.

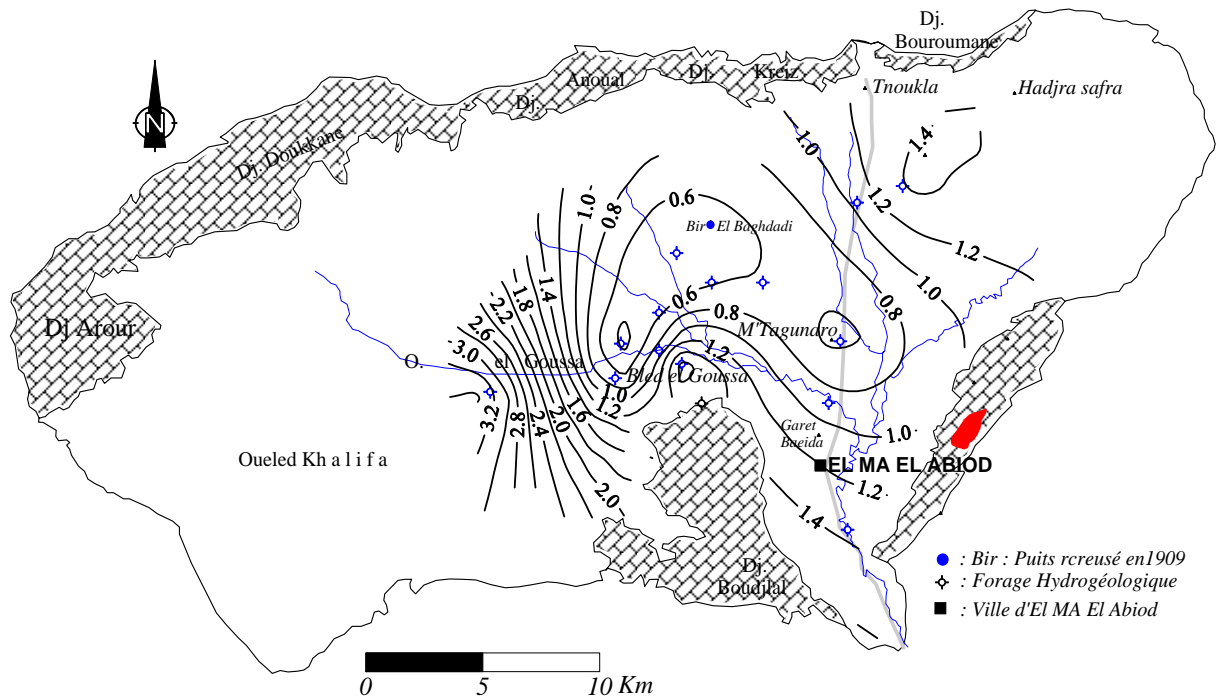


Fig.22 – Carte des Perméabilités en 10^{-4} (m/s)

Les deux cartes des transmissivités et des perméabilités, mettent en évidence l'existence de deux zones importantes, celle d'El Goussa et de Draa El hrakel. Pour tout captage par forage le choix portera sur ces zones respectives, citées par ordre de priorité, et il en est de même pour la protection de la ressource contre la pollution. Ces deux endroits seront prioritaires.

4.3.3. Les essais par pompage

En vue d'enrichir les données hydrodynamiques, nous avons interprété les résultats des essais par pompage entrepris par Baali et Latrache (1994) sur quelques puits équipés. Le tableau (19) présente les résultats des essais obtenus après interprétation des graphiques correspondants (fig.23), avec la méthode CHOW pour la descente et C.E. Jacob lors de la remontée.

N° de puits	Coordonnées		T (CHOW)	T (JACOB)	T. Moyenne
	X	Y	m ² /s descente	m ² /s Remontée	
P ₄₄	990.6	228.40	3.8.10 ⁻⁴	2,6.10 ⁻⁴	3,2.10 ⁻⁴
P ₂₁	997.55	233.50	5.20.10 ⁻⁴	7,8.10 ⁻⁴	6,5.10 ⁻⁴
P ₁₉	999.25	233.30	3.10.10 ⁻⁴	7,3.10 ⁻⁴	6,2.10 ⁻⁴
P _{19bis}	999.05	233.30	2.6.10 ⁻⁴	5,0.10 ⁻⁴	3,8.10 ⁻⁴
P ₄₆	999.12	228.85	4.3.10 ⁻⁴	5,0.10 ⁻⁴	3,8.10 ⁻⁴
P ₄	998.65	235.60	6.1.10 ⁻⁴	4,8.10 ⁻⁴	5,3.10 ⁻⁴
P ₂₈	998.70	231.50	5.07.10 ⁻⁴	7,0.10 ⁻⁴	6,0.10 ⁻⁴
P ₁₃	998.00	234.45	3.10.10 ⁻⁴	7,0.10 ⁻⁴	5,1.10 ⁻⁴
P ₃₁	997.53	230.40	22.30.10 ⁻⁴	8,5.10 ⁻⁴	5,4.10 ⁻⁴
P ₃₅	1004.90	232.30	9.40.10 ⁻⁴	--	--
P ₃₀	997.75	230.40	7.60.10 ⁻⁴	--	--
P ₄₀	995.55	229.30	2.2.10 ⁻⁴	--	--

Tab.19 – Quelques caractéristiques hydrodynamiques des Puits.

Les moyennes des transmissivités obtenues sont de l'ordre de 10⁻⁴m²/s, elles varient selon l'épaisseur de la zone mouillée et la vitesse de l'écoulement dans la zone où sont implantés les puits de pompage.

- Au Nord et au Sud, la transmissivité est moyenne, variant de 5 ,1 et 6,3. 10⁻⁴ m²/s.

- La valeur des transmissivités augmente au Nord-Est pour atteindre 9,4. 10⁻⁴ m²/s, c'est ainsi que ce secteur a connu une multiplication du nombre de puits captant le Miocène

- De faibles valeurs de la transmissivité sont enregistrées au Sud-ouest oscillant entre 2,2 et 3,8. 10⁻⁴ m²/s

Cette répartition des transmissivités est confirmée par les débits d'exploitation des forages. Dans les secteurs qui présentent de fortes transmissivités les débits sont de l'ordre de 30l/s.

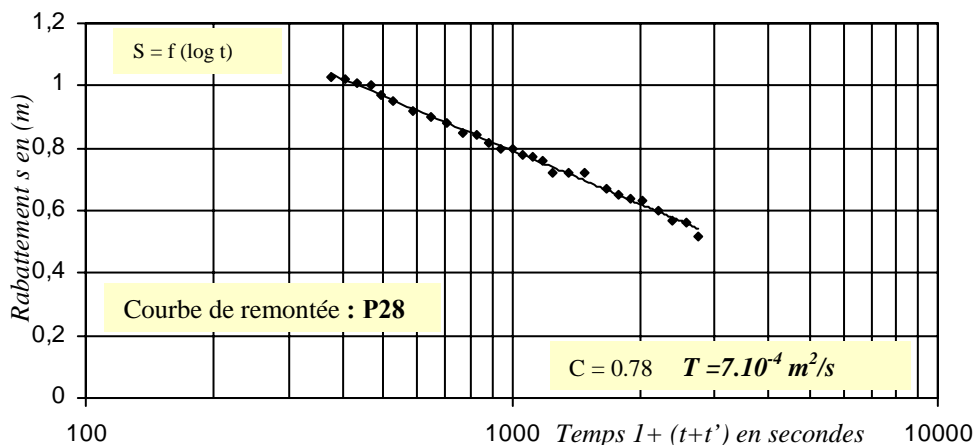
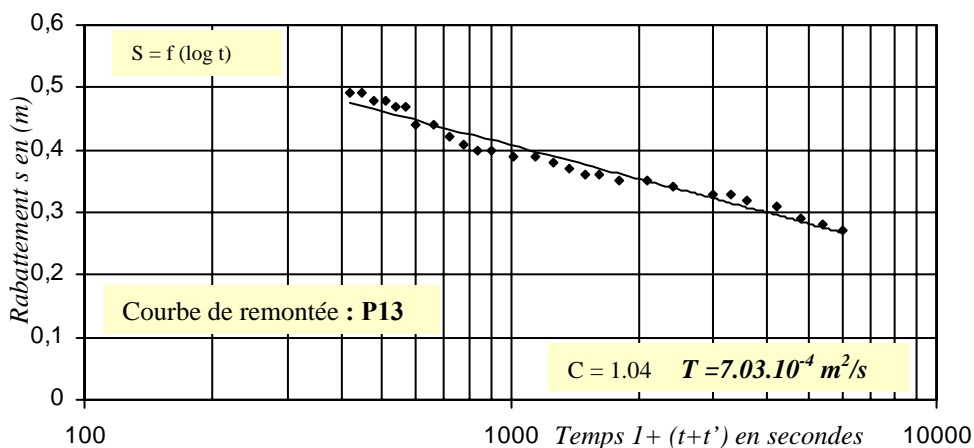
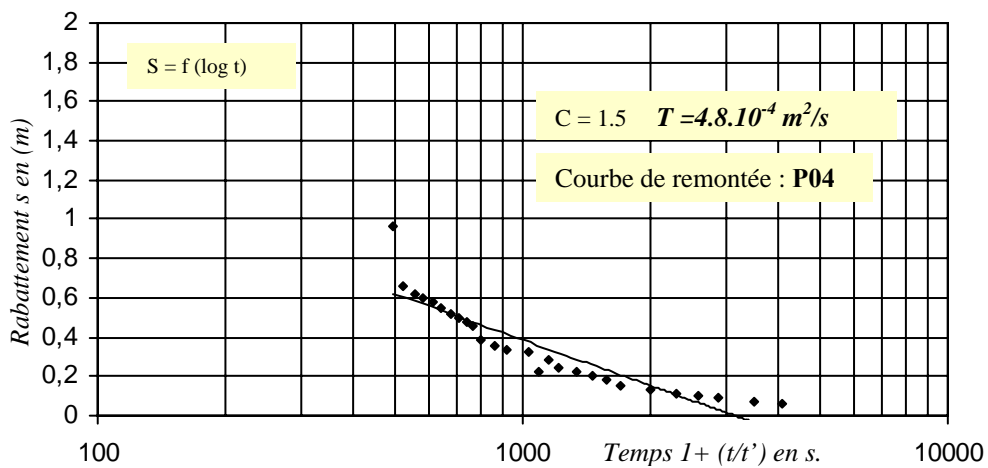
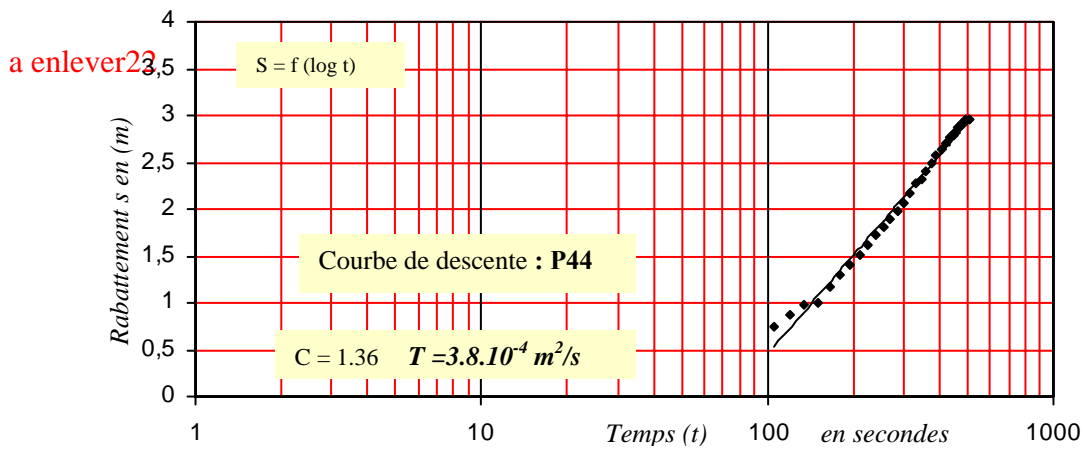


Fig. – Pompages d'essai sur les puits domestiques de la région d'étude

5. PIEZOMETRIE

5.1. Inventaire des points d'eau

Dans les années 1970 et jusqu'à la fin des années 1980, les puits de la région ont été creusés à la main, de grand diamètre et de faibles profondeurs, n'atteignant pas les 12 mètres. Ils captaient alors, à peine la nappe miocène, mais depuis les années 1990 les puits ressemblent beaucoup aux forages de moyenne profondeur, tubés jusqu'à la base et captant directement l'horizon miocène.

Les anciens puits abandonnés sont devenus des dépotoirs divers (cadavres d'animaux, ordures,...etc..) participant ainsi à la contamination de la nappe, ce qui pose le problème de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines.

Dans les deux campagnes entreprises (juillet - août 2000 et octobre 2000) nous avons choisi cinquante puits pour la cartographie piézométrique et hydrochimique, puisque la plaine compte plus d'une centaine de puits irrégulièrement répartis. Nous avons donc été conduits à choisir les puits les plus représentatifs.

Les forages (les puits étatiques) ne diffèrent des puits que par leurs profondeurs, ils captent la nappe miocène. Actuellement, on note 13 forages dont deux sont fermés définitivement à cause de la très haute teneur en sel de leurs eaux, (M₆ et AT₁).

5.2. Évolution de la Piézométrie.

L'objectif principal de l'étude de l'évolution de la piézométrie dans le temps est de visualiser la direction de l'écoulement horizontal et éventuellement vertical (drainance), ainsi que la profondeur du niveau d'eau dans le sol. En effet, les eaux souterraines sont le moyen de transport de toute substance minérale ou organique. C'est d'après l'écoulement qu'on peut reconnaître les zones vulnérables ou contaminées à condition de pouvoir localiser les rejets.

5.2.1. Carte piézométrique : Mars 2001

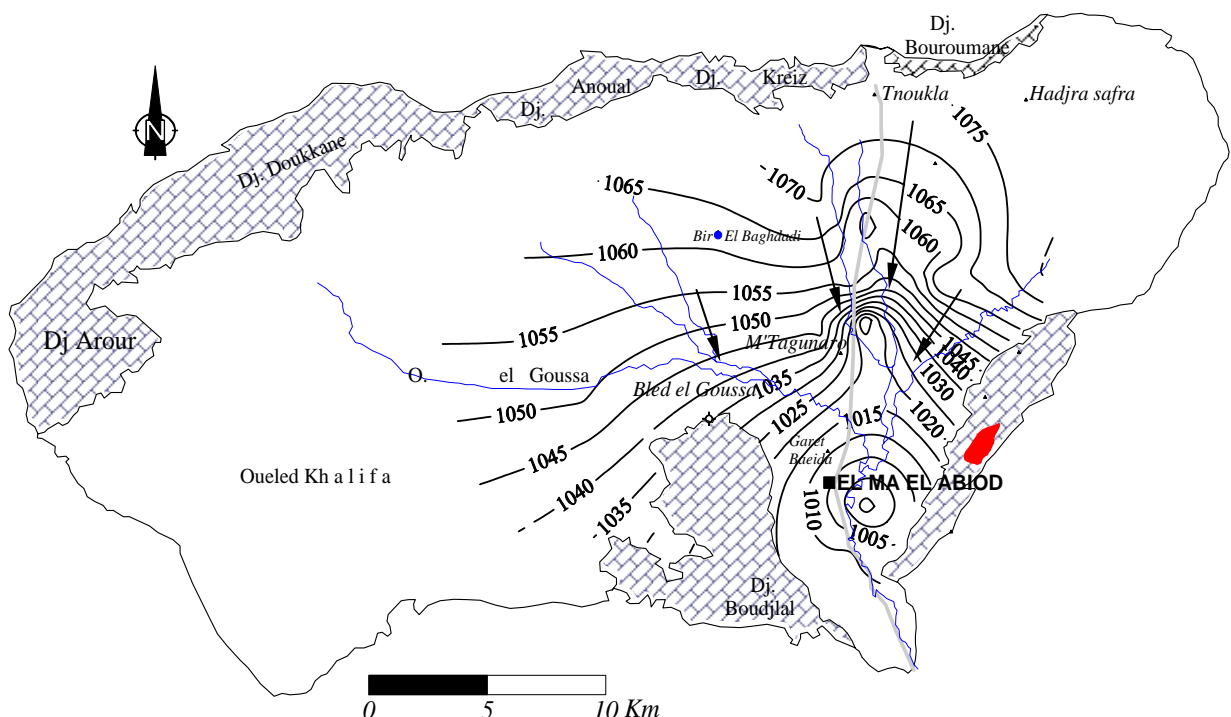


Fig. 24 – Carte piézométrique. Mars 2001

L'examen de la carte piézométrique dont les mesures remontent au début de la période d'observation (2001), fait ressortir trois zones d'écoulement souterrain distinctes :

- Une zone Est où les courbes sont moins serrées caractérisant un débit important, le gradient hydraulique est de l'ordre de 0,019. Les forages exécutés dans cette zone ont donné des débits importants (30 l/s pour le M₁).

- Une zone Nord où l'écoulement est plus important, le gradient est de l'ordre de 0,027, le forage M10 a donné 25l/s à cet endroit et dessine une dépression de la surface piézométrique suite à une surexploitation.

- Une zone Ouest caractérisée par un écoulement faible par rapport à ceux du Nord et de l'Est. Le gradient est de l'ordre de 0,0024. Dans cette partie, la nappe alimente l'Oued El Goussa.

Le sens de l'écoulement se fait vers le Sud pour les trois zones, la profondeur du plan d'eau est faible au sud et au centre, caractérisée par une surexploitation.

5.2.2. Carte piézométrique. Octobre 2002.

Sur la carte piézométrique du mois d'octobre 2002, on peut remarquer un écoulement qui se fait selon une direction prédominante nord- sud, à l'exception de la zone centrale où il dessine une convergence locale.

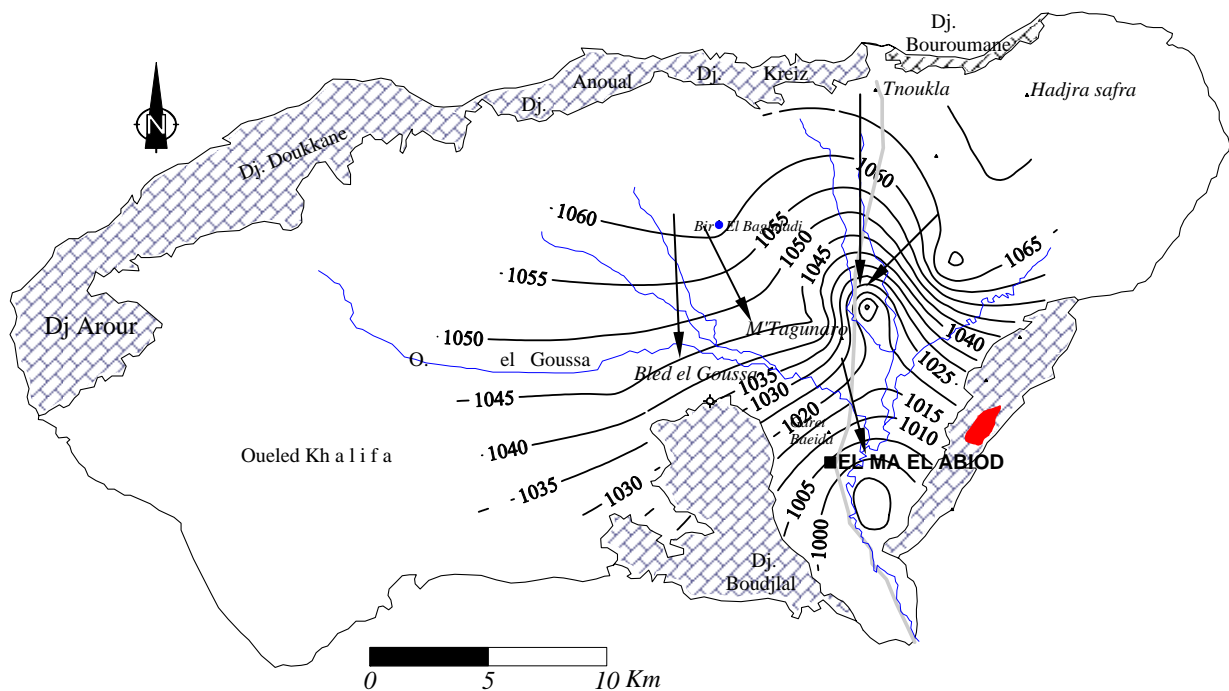


Fig.25 – Carte piézométrique. Octobre 2002

Les puits utilisés pour l'irrigation expliquent la dépression en cet endroit (surexploitation de la nappe), les débits d'écoulement sont importants au centre, le gradient hydraulique est de 0,0045 à 0,0066, respectivement au Nord et à l'Ouest.

5.2.3. Carte piézométrique : Septembre 2003

Sur cette carte l'écoulement se fait suivant un axe général Nord-Sud, qui regroupe les écoulements des zones Sud-Ouest, Nord et Nord-Est. L'écoulement au centre et au sud est rapide, le gradient calculé est de l'ordre de 0,014.

L'état piézométrique présenté traduit les caractéristiques des périodes de basses eaux, notamment en ce qui concerne l'alimentation par les bordures.

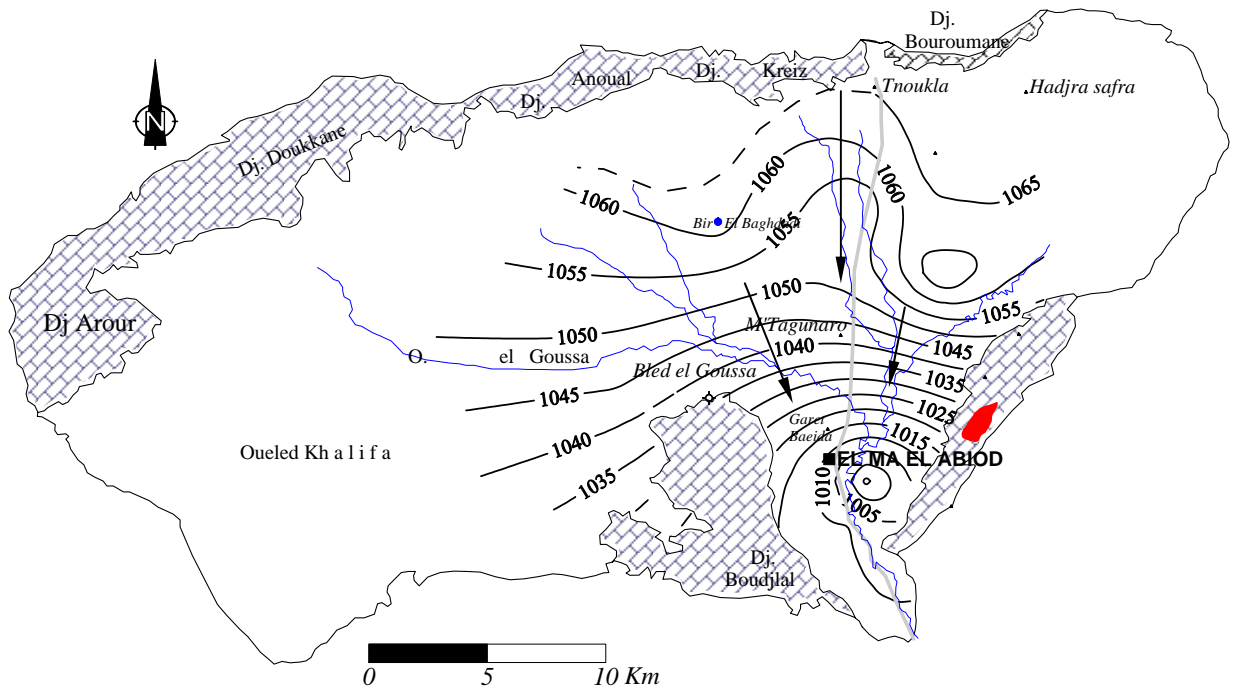


Fig.26 – Carte piézométrique. Septembre 2003

5.2.4. Carte piézométrique : Mars 2003

L'analyse de cette carte révèle la même forme piézométrique que celle décrite pour la carte de la période de septembre 2003, ceci s'explique par un décalage entre les deux périodes et est traduit par la recharge de la nappe.

Les zones dépressionnaires qui sont moins importantes sur la carte de cette période confirment cette interprétation. En effet, pendant cette période, la nappe alluviale semble à l'origine de l'alimentation de la nappe miocène puisqu'on remarque clairement que l'écoulement est très rapide au niveau de Bir el Baghdadi. La superposition de cette carte sur une carte topographique donne une profondeur d'un mètre et demi dans le puits n°12 (Bir El Baghdadi).

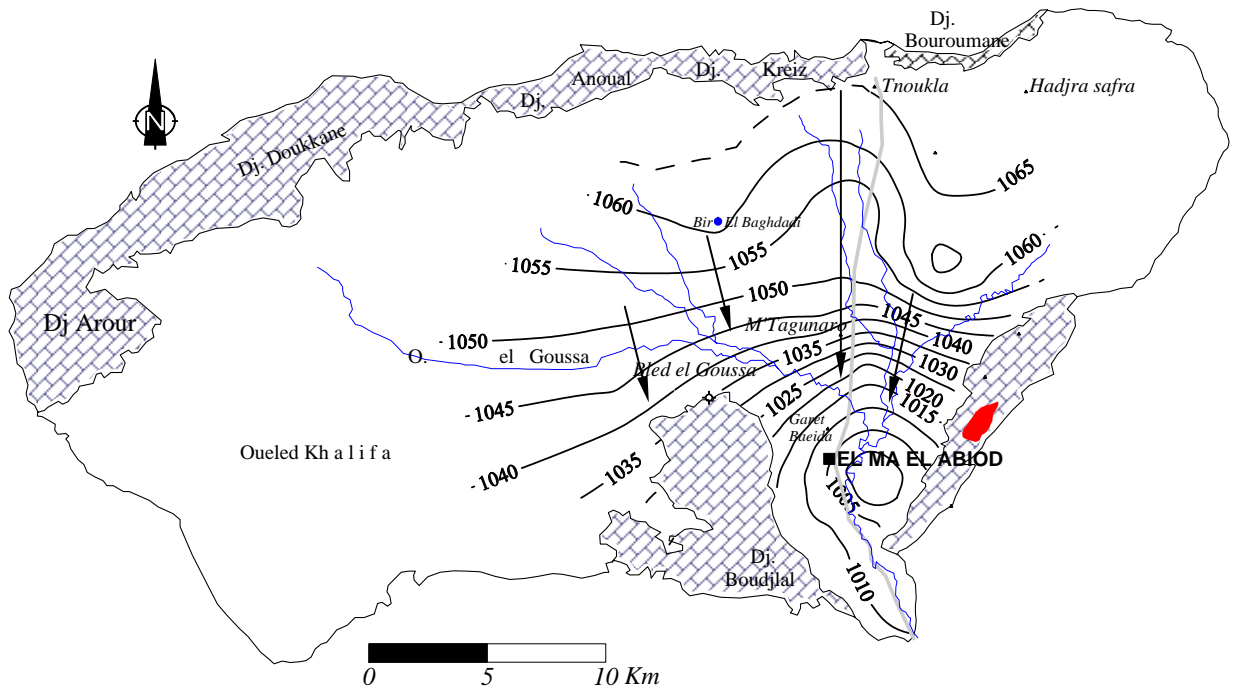


Fig. 27 – Carte piézométrique. Mars 2003

Le gradient hydraulique est identique à celui calculé pour la période précédente, sauf pour la zone nord-est où il présente une augmentation, étant de l'ordre de 0,026.

5.2.5. Carte piézométrique : Mars 2004

Les deux cartes tracées à l'issue des deux campagnes de terrain de l'année 2003, présentent un état piézométrique identique, de même que la carte du mois de mars 2004.

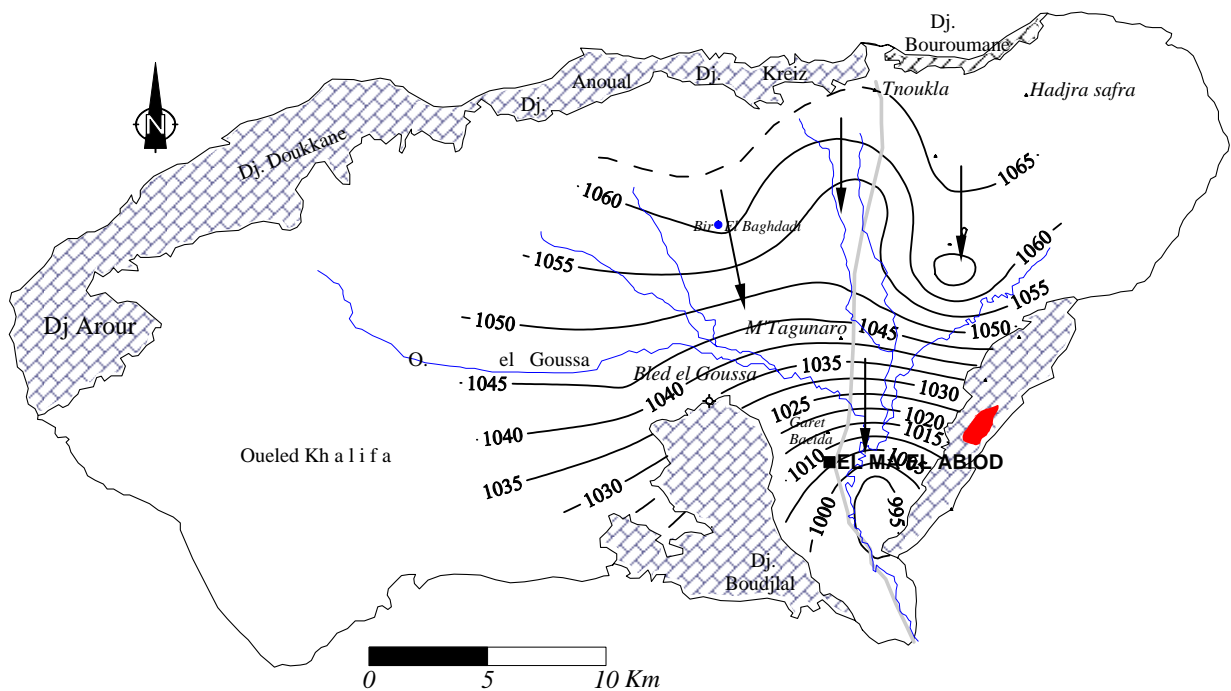


Fig. 28 – Carte Piézométrique. Mars 2004

L'écoulement se fait du Nord vers le Sud avec une convergence locale à l'Est de la plaine, qui se trouve toujours en surexploitation. L'écoulement souterrain est généralement lent.

6. Synthèse des états piézométriques

L'examen des cartes établies fait ressortir que l'écoulement des deux nappes (alluviale et miocène) se fait du Nord vers le Sud et de l'Est vers le Sud (exutoire), les axes principaux des écoulements convergent vers l'aval de l'oued El Ma El Abiod qui draine le système aquifère.

Localement il se dessine des écoulements convergents formant ainsi des dépressions piézométriques, généralement dans le centre de la plaine. Ces écoulements convergents sont causés par une surexploitation des forages (M_{10} , M_9 , M_{13}), et la par concentration des périmètres irrigués à partir des puits de cette partie.

Nous pouvons constater à partir de la piézométrie de la région que :

L'allure générale des isopiezies entre les différentes périodes reste presque constante, l'écoulement se fait généralement du Nord vers le Sud, et les axes principaux convergent vers l'aval de l'oued qui draine la nappe du système aquifère.

La nappe est influencée par le captage, le niveau piézométrique diminue par l'augmentation de l'exploitation d'une part et d'autre part par la diminution de la pluviométrie reçue par le bassin versant dans la dernière décennie d'autre part.

De manière générale, la variation piézométrique des deux nappes est presque identique durant toute la période d'observation, avec uniquement l'apparition d'un seul événement en 2003 où il est clair que durant cette période la nappe a connue une recharge nettement visible sur le graphique de la figure 29.

La nappe alluviale présente des fluctuations plus importantes que la nappe des sables miocènes, liées directement à la température et l'évapotranspiration. L'effet du pompage est aussi remarquable lors des autres campagnes.

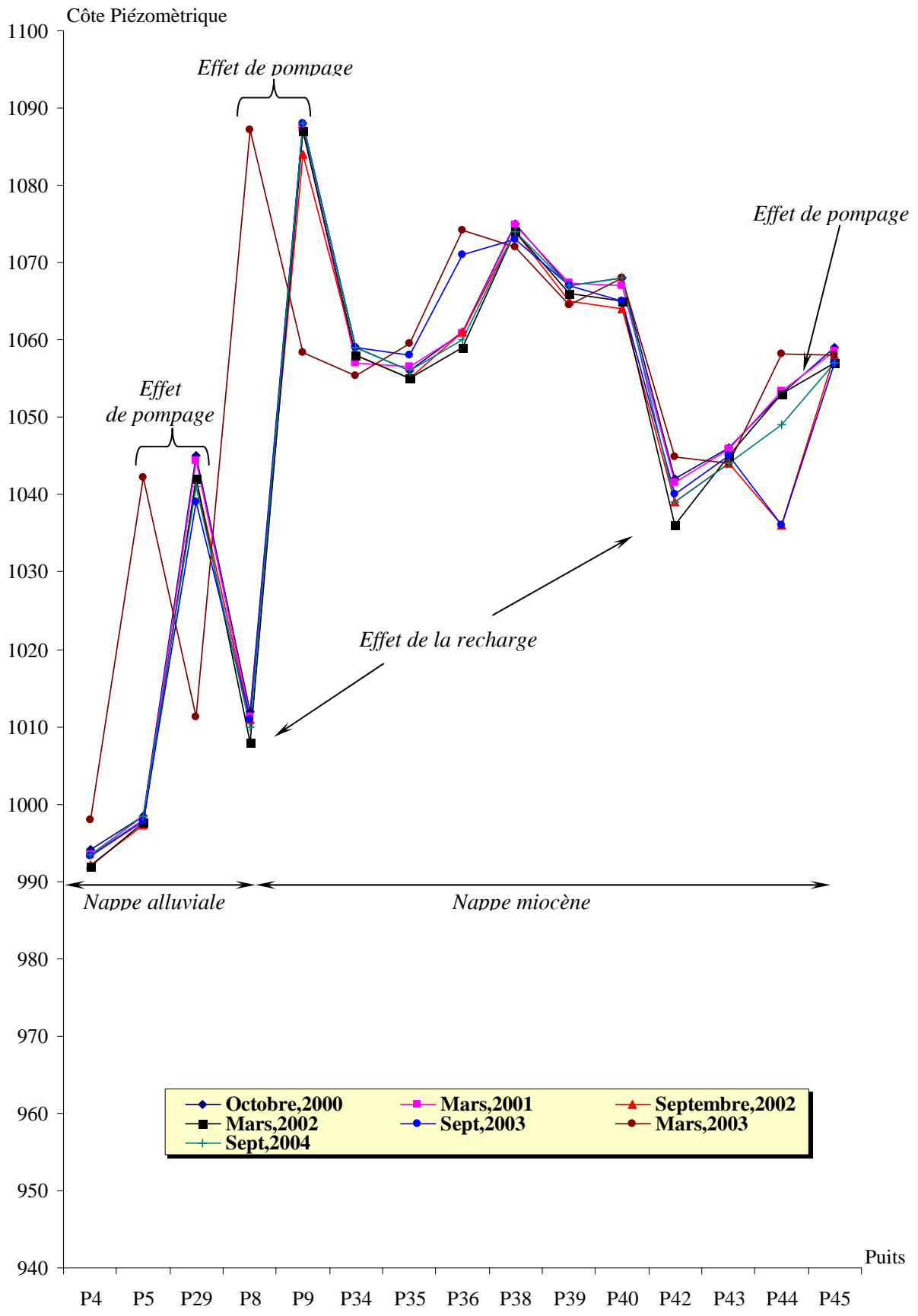


Fig. 29- variation de la cote Piézométrique dans le temps et dans l'espace

7. Bilan du système aquifère

a- Entrée = alimentation du système aquifère

Compte tenu de son mode de gisement et de sa situation géographique, le système aquifère de la plaine d'El Ma El Abiod permet un seul type d'alimentation à partir des précipitations efficaces PE, qui sont égales à la différence entre les précipitations (P) et l'évapotranspiration réelle, (ETR). [ETR (évapotranspiration réelle moyenne annuelle) = 208 mm, soit 455 hm³/an (0,208m x 219 000 000 m²)].

Dans le bassin d'El Ma El Abiod, avec 224mm de hauteur de précipitations annuelle, soit 490 hm³/an, les précipitations efficaces moyennes annuelles sont de 35 hm³/an.

$$\begin{aligned} \text{Précipitations efficaces} &= \text{précipitations} - \text{évapotranspiration réelle} \\ \text{PE} &= \text{P} - \text{ETR} \\ 35\text{hm}^3/\text{an} &= 490 - 455 \end{aligned}$$

b- Sortie = fuites du système aquifère

La précipitation efficace sera répartie, à la surface du sol, en deux fractions, fixes, conventionnelles inégales. (Fig.30)

Le ruissellement, qui alimente l'écoulement de surface Q_S, collecté par le réseau hydrographique. Dans la plaine d'El Ma El Abiod, Q_S = 10 hm³/an.

La lame d'eau infiltrée, quantités qui entretient le débit de l'écoulement souterrain des sorties après circulation dans l'aquifère, soit pour le bassin d'El Ma El Abiod, I = 25hm³/an. Le pompage : d'après les services hydrauliques de la wilaya (DHW), le débit d'exploitation est de l'ordre de 394 l/s, soit 6,08 hm³/an

Le total des entrées et sorties est respectivement ; 490 et 550 hm³/an ; il en résulte donc une différence négative de l'ordre de 60 hm³/an, qui sort du bassin versant, cette partie est liée directement à l'ETR qui est presque égale à la lame d'eau reçue.

c- Bilan

Le bilan révèle que les entrées du système sont inférieures aux sorties, ce qui est dû essentiellement à une perte par l'ETR, dans un climat steppique à tendance aride en été.

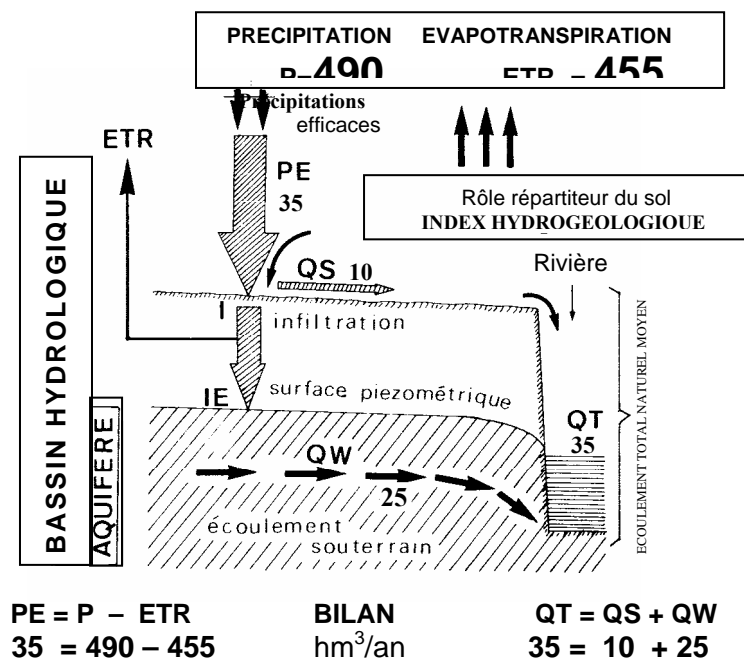


Fig. 30 - Composantes du bilan hydrogéologique Dans le bassin versant d'El Ma El Abiod

Conclusion

L'ensemble du système aquifère d'El Ma El Abiod est constitué par deux nappes, la première de faible profondeur (graviers et argiles sableuses) l'autre profonde (sable et grès du Miocène).

L'épaisseur de la nappe alluviale n'excède pas les 15m (forage M₆), alors que celle de la nappe principale (Miocène) est plus importante, elle forme l'essentiel du système. L'épaisseur de l'horizon aquifère varie de 30m au minimum (forage M₉) à 200m au maximum (forage M₈ : nappe formé de sables, grés, et graviers). Les transmissivités sont de l'ordre de 10^{-4} m²/s, avec des débits d'exploitation de l'ordre de 20l/s.

L'alimentation se fait uniquement par les précipitations soit par infiltration sur l'impluvium de la nappe, soit à partir du massif calcaire.

Le système révèle un bilan hydrogéologique caractérisé par la supériorité des sorties sur les entrées (497 hm³/an devant 518 hm³/an), ce qui est caractéristique d'un climat semi-aride dominé par les mouvements ascendants de l'eau et une sécheresse progressive de l'aquifère.

8. L'INFILTRATION SUR LE BASSIN D'EL MA EL ABIOD

L'infiltration est le nom donné au processus d'entrée de l'eau dans le sol à travers sa surface et verticalement, vers le bas. Le processus d'infiltration dépend du faciès géologique, de l'alimentation en eau de la surface (précipitation et ruissellement), des conditions d'humidité du milieu qui reçoit l'eau et de ses caractéristiques hydrodynamiques.

8.1. Propriétés physiques des sols d'El Ma El Abiod

L'eau dans le sol provient principalement des précipitations atmosphériques et, dans une moindre proportion, des apports humains (irrigation, ré-alimentation de nappe, rejet des effluents dans le milieu naturel).

Quant aux substances chimiques qui arrivent dans le sol, elles sont véhiculées par l'eau et l'air. Aussi il faut noter que l'air contenu dans le sol, la végétation et les organismes jouent un rôle important dans les modifications chimiques et biologiques.

Tout au long du trajet de ces substances de la surface vers les nappes, des processus physiques et chimiques, d'intensité variable selon la nature des milieux traversés et leurs caractéristiques, contribueront à changer et notamment à réduire les niveaux de concentration initiaux (phénomène de nature microbiologiques et d'oxydoréduction).

8.2. L'infiltration

8.2.1. Définitions et paramètres descriptifs de l'infiltration

L'*infiltration* qualifie le transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol, lorsque celui-ci reçoit une averse ou s'il est exposé à une submersion. L'eau d'infiltration remplit en premier lieu les interstices du sol en surface et pénètre par la suite dans le sol sous l'action de la gravité et des forces de succion ou d'attraction moléculaires. L'infiltration influence de nombreux aspects de l'hydrologie, du génie rural ou de l'hydrogéologie. Afin d'appréhender le processus d'infiltration, on peut définir :

a- Le régime d'infiltration $i(t)$, nommé aussi *taux d'infiltration* ou *infiltrabilité*, qui désigne le flux d'eau pénétrant dans le sol en surface. Il est généralement exprimé en

mm/h. Le régime d'infiltration dépend avant tout du régime d'alimentation (irrigation, pluie), mais également des propriétés du sol.

b- L'infiltration cumulative, notée $I(t)$, est le volume total d'eau infiltrée pendant une période donnée. Elle est égale à l'intégrale dans le temps du régime d'infiltration (Fig. 31).

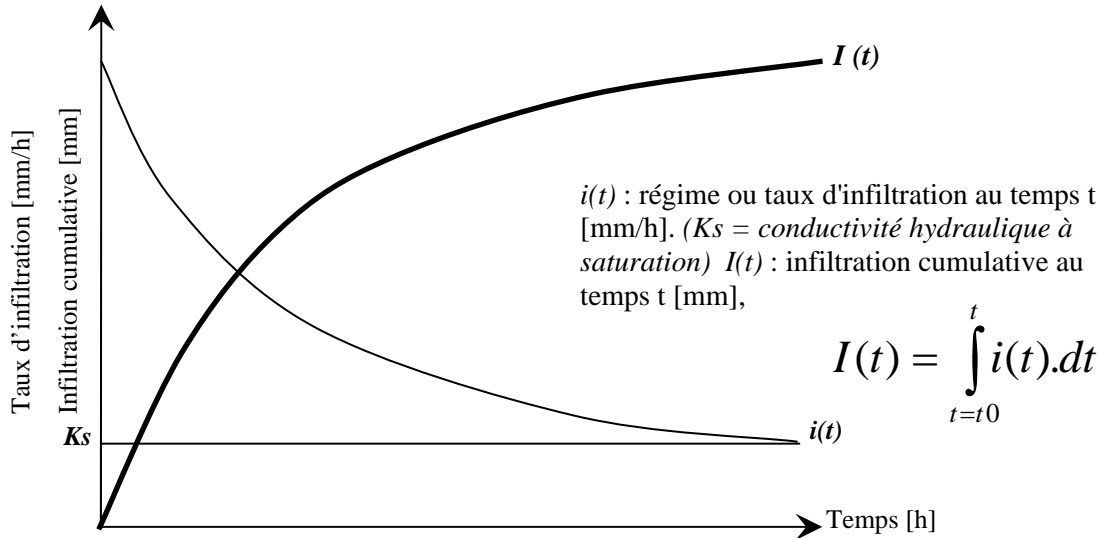


Fig. 31 - Evolution générale du régime d'infiltration et de l'infiltration cumulative au cours du temps

c- La **perméabilité** ou **conductivité hydraulique** à saturation K_s est un paramètre essentiel de l'infiltration. Il représente la valeur limite du taux d'infiltration si le sol est saturé et homogène, c'est aussi le débit infiltré par section unitaire. Ce paramètre entre dans de nombreuses équations pour le calcul de l'infiltration.

d- La **capacité d'infiltration** ou **capacité d'absorption** représente le flux d'eau maximal que le sol est capable d'absorber à travers sa surface, lorsqu'il reçoit une pluie efficace ou s'il est recouvert d'eau. Elle dépend, par le biais de la conductivité hydraulique, de la texture et de la structure du sol, mais également des conditions aux limites, c'est-à-dire de la teneur en eau initiale du profil et de la teneur en eau imposée en surface.

e- La **percolation** désigne l'écoulement plutôt vertical de l'eau dans le sol (milieu poreux non saturé) en direction de la nappe phréatique, sous la seule influence de la gravité. Ce processus suit l'infiltration et conditionne directement l'alimentation en eau des nappes souterraines.

f- La **pluie nette** représente la quantité de pluie qui ruisselle strictement sur la surface du terrain lors d'une averse. La pluie nette est déduite de la pluie totale, diminuée des fractions interceptées par la végétation et stockée dans les dépressions du terrain. La séparation entre la pluie infiltrée et la pluie écoulée en surface s'appelle *fonction de production*.

Le système d'infiltromètre, que nous allons entreprendre sur le territoire de la plaine d'El MA EL Abiod, est utilisé pour la détermination des taux d'infiltration dans les sols ainsi que leur capacité à infiltrer en vue d'une assistance sur des programmes d'irrigation ou de drainage. Ce système est aussi utilisé pour les études sur la variabilité spatiale de ce paramètre en hydrologie.

8.2.2. Facteurs ayant une influence sur la mesure (Structure et texture du sol)

a) *Végétaux présents à la surface du sol*

Les végétaux ont un effet "positif" sur la stabilité de la structure du sol. La combinaison de la végétation et de la présence de racines dans les couches supérieures de sol, stimule la pénétration de l'eau dans les sols. Par conséquent, le taux de pénétration de l'eau dans un sol nu (hors cultures) est moins bon que dans un sol cultivé.

b) *Sols compactés.*

Les sols compactés par des piétinements ou par des roues de véhicules vont conduire à une baisse très sensible des taux d'infiltrations. Cet effet sera plus particulièrement sensible sur les sols argileux ou sablo-argileux. Veiller donc à ne pas installer les systèmes sur un ou des endroits non représentatifs, qui introduiraient des facteurs d'erreur dans vos mesures.

c) *Volume des pores et tailles des particules.*

L'accroissement de la perméabilité correspond à un accroissement du volume des pores d'un sol. Dans un sol sableux, le volume des pores entre les particules affectera spécifiquement la perméabilité. Un sable fin présentant des petits pores inter-particules, présente un faible taux de perméabilité. La perméabilité d'un sol argileux est principalement affectée par sa structure. La présence de micro-galeries (activité biologique en sous-sol, ver de terre etc...) dans un sol argileux peut aussi augmenter le taux d'infiltration de façon très significative. Les sols argileux très secs peuvent enfin présenter des "fentes de retrait" qui vont être très préjudiciables à la mesure faite par l'infiltromètre

d) *Taux d'humidité de l'horizon de surface du sol.*

Si un sol aride est inondé par de l'eau, le taux d'infiltration est initialement élevé jusqu'à diminuer doucement vers une valeur constante (taux d'infiltration de base). Cette réduction est plus rapide dans un sol sec que dans un sol préalablement humidifié. Le taux d'infiltration dépend directement du pourcentage d'humidité du sol

e) *Couches de sol (Horizons ou strates).*

L'infiltration se produit verticalement dans un sol homogène sans horizon différencié. Il est fréquent cependant, que la plupart des sols soient différenciés en horizons (plusieurs couches -ou strates- différenciées), mais pour la simplicité de l'explication de l'infiltromètre, nous considérerons que chaque couche est bien homogène (ce qui peut être différent dans la réalité). Cette hypothèse est appliquée dans les études d'infiltration en vue d'aider au pilotage de l'irrigation. Il est, en outre, parfaitement possible de mesurer les taux d'infiltration de chaque couche (ou horizon) de sol.

f) *Effets saisonniers.*

Les taux d'infiltration et capacités des sols sont très influencés par les changements de saisons et des différents facteurs variant de ce fait, soit le changement de la température de l'eau, de sa viscosité, de l'humidité du sol, de la pousse de la végétation ainsi que de la vie à la surface du sol.

8.3. MESURE DE L'INFILTRATION

Pour mieux comprendre le phénomène de percolation et son effet sur l'évacuation des sels en excès dans la zone des racines pendant les cycles d'irrigation, des essais d'infiltrations ont été conduits dans 12 sites jugés représentatifs dans le bassin versant d'El Ma-El- Abiod, la méthade des anneaux concentriques a été utilisée.

A fin de mieux appréhender le mouvement et les interactions simultanés de l'eau et des solutés dans le sol. Les dimensions de ces anneaux sont reportées au tableau du schéma explicatif de la méthode suscitée (Fig.32) celle-ci consiste à suivre la percolation des eaux dans le sol en fonction du temps, les résultats sont exportés dans le tableau (Tab.20).



La capacité d'infiltration des sols étudiés a été déterminée par ajustement de la loi de HORTEN (1940) définie sur la figure 32.c.

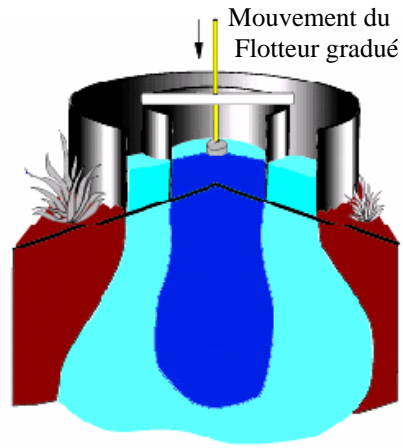
Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau. Il apparaît que la capacité d'infiltration finale varie entre 0,78 et 6,94 cm/s.

Date	site	Coordonnées L.		Tube	F (l/h)	Fc (cm/s)	Coefficient de perméabilité K (cm/h)
		X	Y				
22.09.2003	01	998.05	224.98	101	2.24	0.78	1,0. 10 ⁻⁴
22.09.2003	02	1000.06	226.93	102	4.41	1.08	0,6. 10 ⁻⁴
22.09.2003	03	999.13	232.9	103	6.84	2.16	1,0. 10 ⁻⁴
23.09.2003	04	1001.9	233.7	104	5.86	1.83	0,9. 10 ⁻⁴
23.09.2003	05	998.02	234.11	105	11.7	4.91	1,2. 10 ⁻⁴
24.09.2003	06	996.75	235.53	106	8.82	3.24	0,7. 10 ⁻⁴
24.09.2003	07	995.08	233.92	107	16.2	3.96	0,9. 10 ⁻⁴
24.09.2003	08	992.13	234.94	108	4.5	2.7	1,3. 10 ⁻⁴
25.09.2003	09	993.07	230.02	109	13.5	6.94	0,8. 10 ⁻⁴
25.09.2003	10	990.9	232.03	110	8.81	3.26	0,8. 10 ⁻⁴
26.09.2003	11	987.93	228.75	111	4.66	1.02	1,3. 10 ⁻⁴
26.09.2003	12	986.10	230.89	112	12.1	5.65	1,2. 10 ⁻⁴

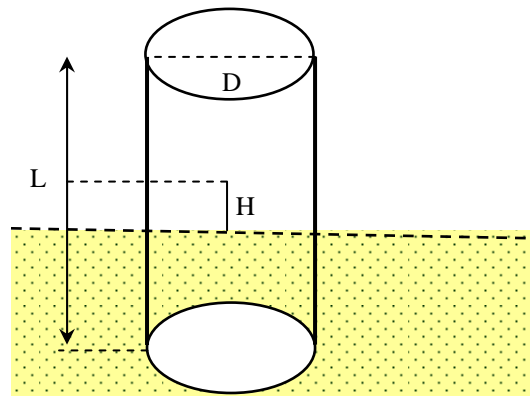
Tab.20 – Résultats des essais d'infiltration sur le bassin versant d'El Ma El Abiod.

8.4. Cartographie du paramètre mesuré.

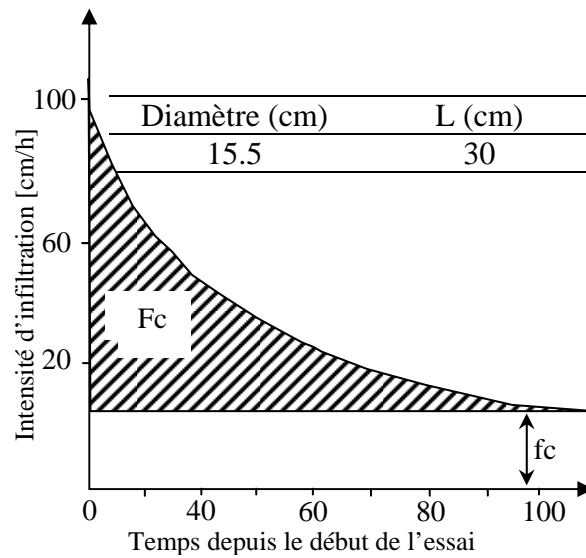
A partir des résultats nous avons procédé à une cartographie de l'infiltration, pour voir les zones qui vont être sensibles à la pollution, par leur capacité de transférer l'eau verticalement depuis la surface du sol.



- a - Fonctionnement de l'Infiltromètre



- b -



- c -

$$f = fc + (f_0 - fc)e^{-kt}$$

f : capacité d'infiltration à l'instant t . fc : Intensité d'infiltration ultime

f_0 : Intensité d'infiltration initiale. K : constante = $(f_0 - fc)/Fc$

Fc est définie sur la figure

Fig. 32 - Schéma simplifié d'un anneau (tube) concentrique, utilisé dans les essais d'infiltration

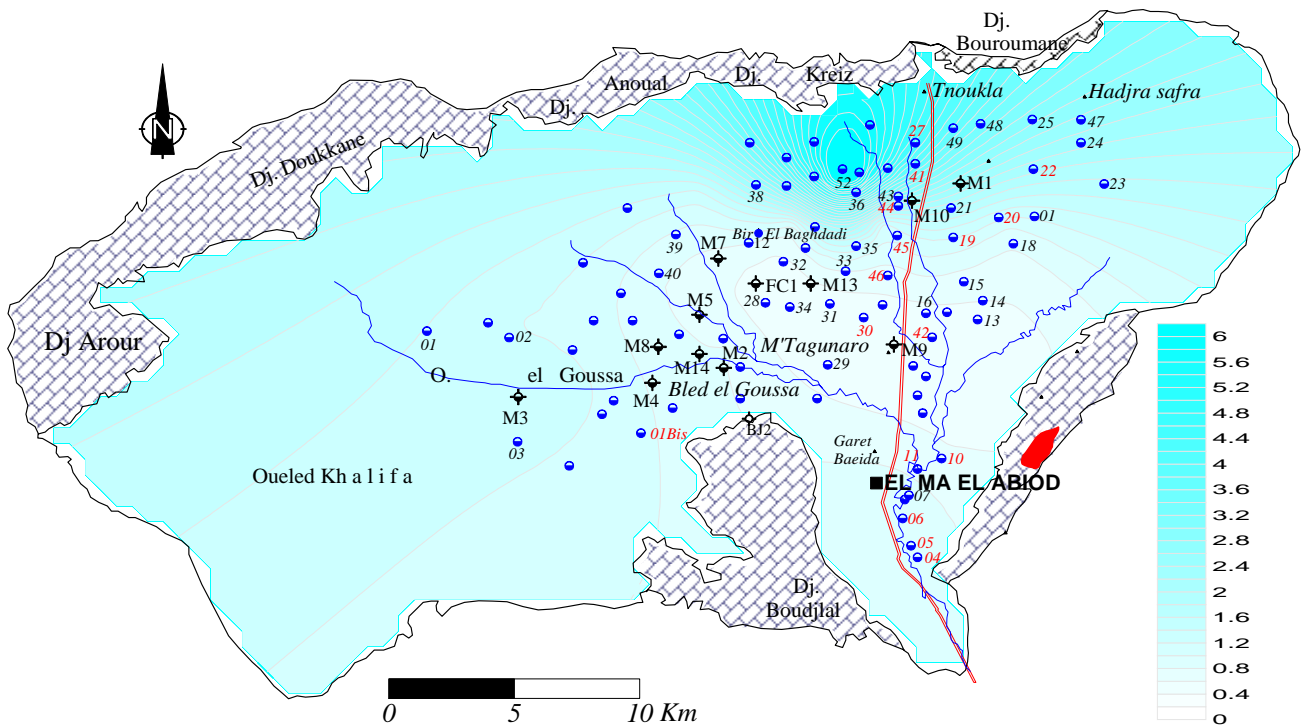


Fig. 33 – Carte de l'infiltration en cm/h. « Rouabhia septembre 2003 »

D'après les résultats obtenus, il apparaît que la capacité d'infiltration final varie entre 0.4 et 6 cm/h sur l'ensemble de bassin. Les sols ayant une granulométrie plus ou moins fine, sont caractérisés par des capacités d'infiltration moyenne, de l'ordre de 1.2, 2, 3.6 dans les zones Est, Ouest et Sud. Ceci laisse supposer l'existence de sources d'erreurs expérimentales.

Ces sources d'erreurs se résument à la perturbation de l'état naturel du sol, à l'influence de la couverture végétale souvent absente, à la présence probable de bulles d'air. C'est pour cela que les résultats restent toujours conservatifs et doivent être interprétés comme étant des ordres de grandeurs. Néanmoins les résultats du tableau 20 indiquent que les sols de la plaine d'El Ma El Abiod sont caractérisés par un drainage moyen à assez bon.

La carte montre une infiltration très importante sur les bordures au Nord, là où les sables et grès sont en contact direct avec les bancs de calcaires, qui les alimentent notamment au début du printemps lorsque commence la fonte de la neige sur les sommets. Elle est faible au centre à M'Taguinaro où la surface du sol est constituée d'une croûte calcaire, à cet endroit, le terrain est sec et le couvert végétal absent. L'écoulement de surface est très important du fait de la pente du terrain.

9. RETOUR DES EAUX D'IRRIGATION

Les activités anthropiques et particulièrement agricoles ont tendance à se développer de préférence à proximité des cours d'eau et mieux encore là où le plan d'eau est facile à atteindre. La plaine d'étude constitue un secteur privilégié en région semi aride caractérisée par un remplissage alluvionnaire dont les niveaux piézométriques sont très proches de ceux d'un sol généralement très fertile.

Dans le but de mettre en évidence le risque que peut présenter le retour des eaux d'irrigation sur la qualité de l'eau de l'aquifère, nous avons entrepris une enquête analogue à celle de YOUNSI Abdelkader (2001) de l'université d'El Jadida (Maroc).

9.1. Enquête statistique

9.2. Classification des puits recensés :

Le total des puits examinés lors des campagnes piézométriques est de 173 puits, ce qui est inférieur au nombre de puits existant dans la région. Toutefois, les puits examinés représentent un bon pourcentage de l'ensemble des puits de la zone.

Puits inventorié	Nombre	%
Puits abandonnés	26	15.03
Puits en pompage	125	72.25
Puits Alimentation Eau Potable (Forage : AEP)	12	6.94
Puits autres	10	5.78
Total de puits examinés	173	100

Tab. 21- Inventaire des puits recensés dans la région.

Le nombre de puits abandonnés (fig. 34) est élevé, on peut constater que leur action néfaste est doublement remarquable : dégradation de la qualité et de la quantité des eaux de la nappe.

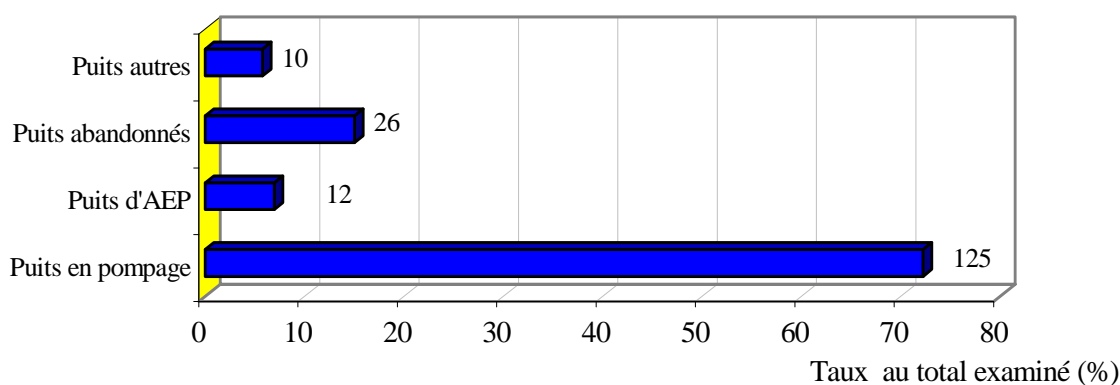


Fig.34-Classification des puits recensés en pourcentages.

9.3. Puits abandonnés

Les puits abandonnés recensés représentent environ 15,18 %, ce qui est un pourcentage sous-estimé à cause de l'existence de secteurs non couverts, et par le fait que ces puits abandonnés se situent dans des secteurs à risque sécuritaire.

Les puits abandonnés revêtent un intérêt primordial dans notre travail sur la dégradation qualitative et quantitative des eaux souterraines étudiées. Leur localisation permettrait une zonation de la salinité et des zones où l'on observe un assèchement des puits ou un dénoyage de la nappe.

En effet, durant nos campagnes de mesures et d'observation de la nappe depuis 2000, il a été montré que les motifs d'abandon des puits sont soit l'assèchement du puits, soit l'existence d'une salinité élevée (tab.22).

Cause d'abandon	Nombre
Abandon pour assèchement	13 : (50%)
Abandon pour salinité élevée	6 : (23.08%)
Abandon autre	7 : (26.92%)
Total des puits abandonnés	26 : (100%)

Tab. 22- Statistiques sur les différents types de puits abandonnés.

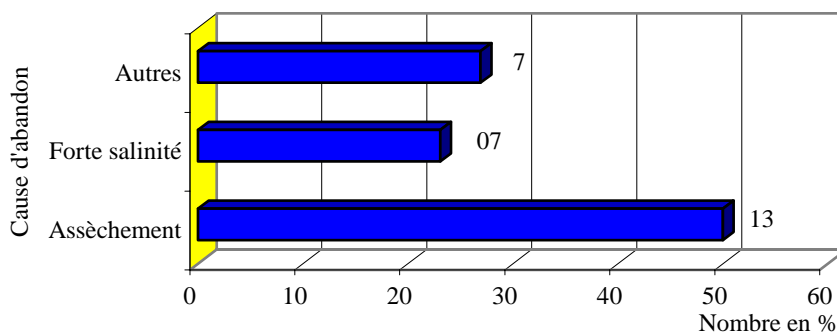


Fig. 35- Les pourcentages des différentes causes d'abandon des puits.

Dans la région étudiée, les principaux aspects liés à la dégradation quantitative de la nappe peuvent être énumérés comme suit :

- Baisse des niveaux piézométriques et réduction rapide des lames d'eau des puits en pompage ;
- Diminution des fréquences de pompage, avec des durées parfois très courtes.
- Abandon de terres qui étaient très fertiles et remplacement des puits par de nouveaux creusements situés plus à l'amont ;

Quant aux aspects liés à l'abandon des puits à cause des fortes salinités, ils sont comme suit :

- Régression des surfaces cultivées et irriguées.
- Les cultures irriguées et principalement les plantes maraîchères ne sont plus pratiquées dans ces secteurs qui sont devenus soit des terres « bour » ou des terres totalement délaissées.

Occupation des sols :

Sur l'ensemble de la plaine, plusieurs modes d'irrigation sont pratiqués dont le plus utilisé est le gravitaire (avec un taux d'environ 90 %). Cette utilisation engendre des pertes appréciables d'eau pompée et une pollution des eaux souterraines par les retours d'eau

d'irrigation concentrée par évaporation et lessivage. L'irrigation par goutte à goutte est plutôt utilisée pour les cultures arboricoles.

Les maraîchages dominent dans la région, principalement avec la tomate et la pomme de terre. La culture « bour » qui dépend des aléas climatiques, gagne de l'espace à cause de l'abandon des terres initialement irriguées par les eaux de la nappe.

9.4. Prélèvements :

L'évaluation des prélèvements s'avère d'une grande importance afin d'actualiser le bilan hydrique de la nappe et de déterminer les effets des pompages sur la nappe.

La réalisation des forages a commencé en 1970. L'équipement des puits à des fins de pompage n'a commencé de manière prononcée qu'à partir de l'année 1971. La fréquence de pompage est parfois très médiocre (15 mn / j) du fait des faibles lames d'eau de certains puits. ce qui semble montrer une régression des ressources en eau souterraine de la région due à des baisses du niveau piézométrique.

Dans la région d'El Ma El Abiod, nos observations ont montré que les effets de la surexploitation des eaux souterraines sont limités à la bande des sables miocènes. Le tableau 23 montre que la fréquence de pompage est relativement élevée dans la partie SW.

Secteur	Puits en pompage recensés	Taux (%)	Débit moyen de pompage (l / s)	Fréquence moyenne de pompage		
				h / j	j / mois	mois / an
Partie NW	58	62	2.8	7.7	29	12
El Goussa	24	50	3	4	24	10

Tab. 23-Statistiques sur les pompages des eaux souterraines.

L'évaluation des prélèvements dans la nappe peut se faire à partir des débits et des fréquences de pompage. Ainsi, en connaissant les superficies irriguées, deux cas se présentent :

- si l'on connaît le débit pompé (qi) et les fréquences de pompage (en h / j, j / mois et en mois / an), le débit fictif continu (Qi_1) s'écrit :

$$Qi_1 = qi * (h / j) * (j / mois) * (mois / an)$$

- à partir de ce débit (Qi_1), nous pouvons évaluer le débit moyen prélevé (qM) par hectare (Si) selon la formule suivante :

$$qM = \text{moyenne arithmétique } (Qi_1 / Si) ;$$

- si qi est non mesuré et Si est connue, le débit fictif continu prélevé est :

$$Qi_2 = qM * Si$$

- Si (qi) et (Si) sont inconnus (c'est le cas des puits non équipés destinés uniquement aux besoins domestiques), le débit fictif continu (Qi_3) pour un foyer de 10 personnes consommant en moyenne 500 l / jour, s'écrit :

$$Qi_3 = 0.005 \text{ l / s}$$

Zone	Débit moyen (l / s / ha)	Débit continu moyen (l / s)	Débit annuel continu moyen (Mm ³ / an)
Partie NW	0.82	695	21.9
El Goussa	0.23	87	2.76

Tab. 24- Statistiques sur les prélèvements d'eau pour l'irrigation.

En se basant sur ces formules et d'après les résultats recueillis sur les puits et les exploitations recensées, les prélèvements moyens sur l'ensemble de l'aquifère sont de 26.66 mm³ / an et le débit moyen prélevé par hectare est de 0.36 l / s / ha. Les prélèvements moyens relatifs seulement à la partie SW de la zone étudiée et dans le secteur d'El Goussa sont résumés dans le tableau n°25.

Zone	Débit moyen prélevé (l / s / ha)	Débit fictif continu moyen (Mm ³ / an)	Superficie irriguée (ha)	Nombre de foyers desservis
Partie NW	0.82	22.26	731	190
El Goussa	0.27	2.86	405	42

Tab. 25- Les débits moyens prélevés pour l'irrigation et l'alimentation.

En conclusion, la zone la plus exploitable de l'aquifère est la partie centrale comprise entre El Hadjra Safra et Bir el Goussa. Ses ressources souterraines sont fortement mobilisées pour l'irrigation des cultures maraîchères. Son débit fictif continu prélevé est d'environ 22.26 Mm³ / an. Ces chiffres constitueront plus loin des termes de base dans l'estimation du bilan hydrogéologique de la nappe.

9.5. Estimation des retours d'eaux d'irrigation :

Les eaux d'irrigation qui retournent vers la nappe, ont été estimées (lors des essais d'infiltration), Il s'agit d'environ 17 % du volume total des eaux souterraines pompées dans la nappe. L'estimation des retours des eaux d'irrigation (**Ri** en Mm³ / an) vers la nappe est fonction des débits de pompage des eaux souterraines (**Qp** en Mm³ / an) :

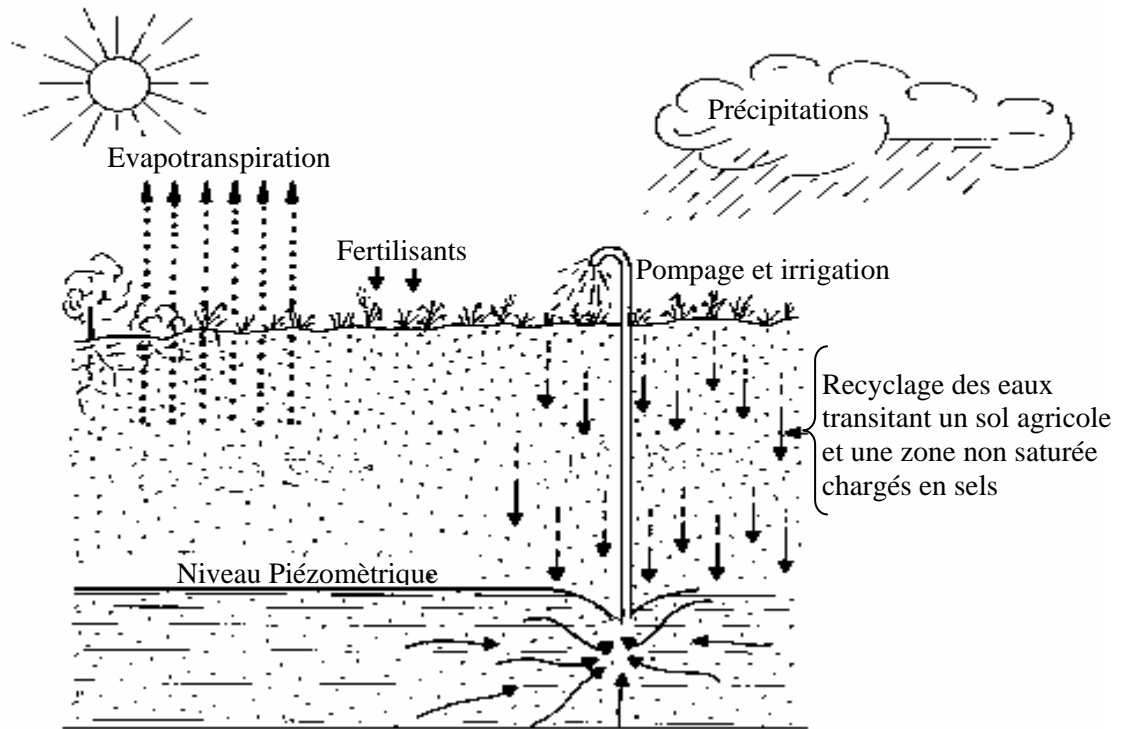
$$\mathbf{Ri \text{ (Mm}^3 \text{ / an)} = Qp \text{ (Mm}^3 \text{ / an)} * \text{Tr,} \quad (\text{Tr : taux de retour})$$

A titre d'exemple, la partie NW de la région étudiée dont le débit continu prélevé moyen est de 22.26 Mm³ / an, admet des retours d'eau d'irrigation d'environ 3.78 Mm³ / an.

Ces eaux de retours vers la nappe transitent à travers des sols agricoles et une zone non saturée riches en sels et en nitrates. Ces derniers proviennent de sources différentes :

- Fertilisants agricoles ;
- Eau d'irrigation qui est une eau souterraine à salinité parfois importante (région de M'Tagunaro par exemple). Des éléments chimiques (chlorures, nitrates, ...) sont apportés par l'eau dans le sol à chaque irrigation et leur concentration va augmenter après chaque cycle cultural et après chaque année.
- Quantité des sels non utilisés par les plantes et qui augmente chaque année ;
- Concentration des solutions de la zone non saturée par évaporation lors des périodes où le sol est nu ...

Ces sels et nitrates d'origines diverses sont lessivés par les eaux d'irrigation qui sont déjà chargées en éléments chimiques et entraînées vers la nappe (problème qui sera développé dans le chapitre hydrochimie). La ré-infiltration des eaux d'irrigation constitue une source potentielle de dégradation de la qualité des eaux souterraines, principalement dans les secteurs où la nappe circule à de faibles profondeurs de la surface du sol. Les cartes piézométriques montrent que ce sont surtout les secteurs centraux et la partie sud où les niveaux sont les plus proches du sol, qui seront les plus vulnérables à une pollution par le retour des eaux d'irrigation.



**Fig. 36 - Sources naturelles et anthropiques de salinité :
Evapotranspiration, Recyclage des eaux et Fertilisation**

De manière générale, et à la suite de cette enquête on peut affirmer que le risque de dégradation de la qualité des eaux souterraines (augmentation de la salinité) de la plaine d'El Ma El Abiod a été accompagné d'une dégradation de la quantité (baisse des niveaux statiques) particulièrement dans les puits qui captent le premier horizon comme ceux des environs de la Mechta d'E'Zouiria. Cela a conduit dans certains endroits à l'abandon des puits à cause de leur assèchement et dans quelque cas à cause de leur salinité élevée (notamment en aval de la plaine). Les terres qui étaient autrefois fertiles sont devenues actuellement stériles et délaissées (secteur Ouest à El Goussa)

L'abandon pour assèchement des puits est toutefois plus fréquent que l'abandon pour une salinité élevée, ainsi les aspects suivants peuvent être à l'origine de ce risque :

- Baisse du niveau Piézométrique
- Creusement anarchique des puits dans les deux niveaux (quaternaire et miocène)
- Utilisation mal maîtrisée d'engrais agricoles
- Salinisation par le recyclage de l'eau à travers le sol agricole
- Abandon des puits

Chapitre 5

***HYDROCHIMIE & QUALITE DES EAUX
SOUTERRAINES DU SYSTEME
AQUIFERE DE LA PLAINE
D'EL MA EL ABIOD***

1. INTRODUCTION

Le chimisme naturel des eaux dépend essentiellement de la composition géologique des milieux traversés et du temps de séjour. Le chimisme est principalement régi par les équilibres calco-carboniques (Ca^{++} , HCO_3^-) auxquels viennent se greffer des éléments en provenance de l'environnement alluvial (Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^-) et des éléments d'origine biologique (NO_3^- , NO_2^- , et NH_4^+).

L'intérêt principal de cette partie de l'étude est de mieux caractériser la qualité des eaux souterraines de la plaine d'El Ma El Abiod, et ses variations dans l'espace et dans le temps, afin de voir l'état du système vis-à-vis de la pollution.

Par définition, l'eau est un liquide naturel qui se forme par condensation en altitude, puis elle acquiert son chimisme au cours de son trajet, par dissolution des gaz et absorption des composés solubles et insolubles présents dans l'air. Au sol, elle traverse les formations géologiques perméables, ce qui augmente sa minéralisation par lessivages des roches.

Les eaux de la plaine d'El Ma El Abiod se répartissent en trois groupes :

- Les eaux de sources
- Les eaux de surfaces (les oueds)
- Les eaux souterraines.

Afin de tenter connaître le régime, l'origine, le mécanisme du chimisme et de caractériser la qualité des eaux souterraines de la plaine d'El Ma El Abiod dans le but de mettre en évidence la présence d'une pollution d'origine anthropiques neuf (09) campagnes hydrochimiques ont été entreprises. Le tableau n°26, donne une récapitulation sur ces campagnes :

Campagne	période		Nbr Ech.	Laboratoire d'analyse
	Mois	Année		
01	Oct.	2000	52	Dpt. Chimie Univ. Annaba + Lab. Hopital Annaba
02	juin	2002	20	Ecole Univ. des Ingénieurs de Lille (France)
03	avril	2003	20	CERAT de S.N. Ferphos Tébessa
04	Oct.	2003	22	CERAT de la S.N. Ferphos Tébessa + EUDIL Lille
05	mars	2004	12	CERAT de la S.N. Ferphos Tébessa
06	juin	2004	12	CERAT de la S.N. Ferphos Tébessa
07	Sept.	2004	12	CERAT de la S.N. Ferphos Tébessa
08	Déc.	2004	12	CERAT de la S.N. Ferphos Tébessa
09	mars	2005	20	Institut de Chimie Univ. Lille (France)

Tab. 26– Répartition et fréquence des prélèvements hydrochimiques

Les prélèvements ont été effectués selon une répartition et une fréquence différente d'un site à l'autre ; qui dépend de la profondeur des eaux, du type des formations géologiques des implantations industrielles et agricoles et de la disponibilité des ouvrages.

2. Matériels et moyens d'analyse

Les analyses sont portées essentiellement sur les éléments chimiques majeurs. Les méthodes employées sont le dosage colorimétrique (NO_3^- , NO_2^- , et NH_4^+) et nuphélométrique, après précipitation du chlorure de baryum pour (SO_4^-). La spectrophotométrie d'absorption atomique (Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , SiO_2^+ , Cl^- , Sr^+ , Zn , Pb) Les

caractéristiques physiques, tels que la température, le PH., la conductivité ont été mesurées à l'aide d'une sonde multi paramètres WTW.

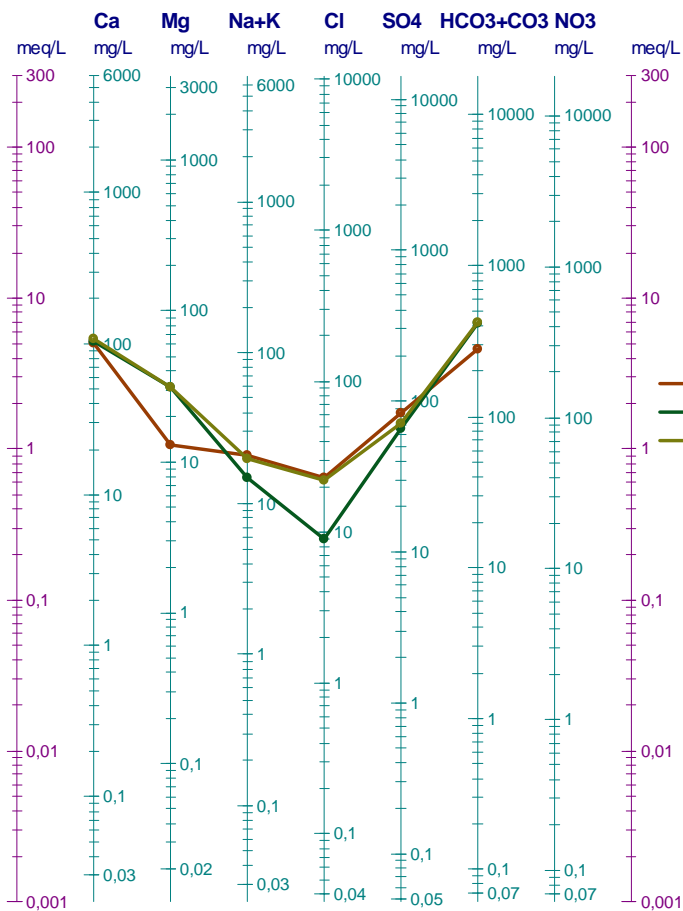
2.1. LES EAUX DE SOURCES

Actuellement, et depuis cette dernière décennie, les sources ont cessé de couler. Auparavant elles participaient à la satisfaction des besoins en eaux de la région (source de Ain T'noukla). Les seuls résultats d'analyses en notre possession sont ceux de l'agence nationale des ressources hydriques (ANRH) et qui datent 1984 représentés sur le tableau ci-dessous.

Sources :	Kriz	Rhorira	T'noukla
éléments	en mg/l		
Ca ²⁺	101	104	109
Mg ²⁺	13	31	31
Na ⁺	17	10	14
K ⁺	4	5	6
Cl ⁻	23	9	22
SO ₄ ²⁻	83	66	71
HCO ₃ ⁻	281	421	422
NO ₃ ⁻	-	-	-

Tab. 26.1- Quelques analyses des eaux de sources

La formule ionique nous a permis de constater que les trois sources présentaient un faciès bicarbonaté calcique.



Le diagramme de Schoeller berkalloff confirme le faciès bicarbonaté calcique, des trois sources. (fig.36.1)

La faible minéralisation des eaux est liée à un écoulement rapide dans les formations carbonatées de la bordure Nord du terrain.

Fig. 36.1- Diagramme de Scholler-Berkaloff.
Eaux de sources

3. LES EAUX DE SURFACE.

3.1. Détermination des faciès chimiques

Les eaux de l'oued El Ma El Abiod ont un faciès chloruré-calcique à sulfaté-calcique. Lors des crues, cette remarque a été confirmée par les analyses de la première campagne du mois d'octobre 2000 qui coïncide avec une crue très importante.

Le premier faciès est le résultat de l'action combinée des formations argileuses salifères et des calcaires en aval de la plaine d'une part, et de l'activité humaine d'autre part. Le deuxième faciès quant à lui met en évidence l'intervention des pluies en second lieu du fait du lessivage des terrains agricoles et de la collecte des effluents de cet oued.

Quant à l'oued El Goussa, il présente un faciès chloruré-calcique pendant les périodes de son écoulement (écoulement tributaire de la pluviométrie), ce qui s'explique par une origine géologique.

4. LES EAUX SOUTERRAINES.

4.1. Détermination des faciès hydrochimiques

A partir des calculs des quantités en réaction (conversion des concentrations en mg/l) et la classification des ions (formule ionique), nous avons déterminé les faciès qui se résument dans le tableau suivant :

	Chloruré calcique	Chloruré magnésien	Chloruré sodique	sulfaté calcique	sulfaté magnésien	bicarbonaté calcique
2000	39%	00%	3%	19%	6%	33%
2002	04%	07%	06%	00%	78%	00%
2003	45%	15%	10%	25%	00%	05%
2004	60%	10%	10%	05%	07%	13%

Tab. 27- Évolution statistique des faciès

Sur toute la période d'observation, on a remarqué que la majorité des puits (80%) présentent un changement de faciès hydrochimique. Et uniquement 20% qui gardent le faciès «chloruré-calcique» dominant entre les campagnes. On explique le changement du faciès par la pluviométrie (diminution et/ou augmentation des concentrations par dilution).

La répartition du faciès chloruré-calcique et bicarbonaté-calcique est remarquable à l'intérieur de la plaine, par contre le faciès sulfaté-magnésien garde le même pourcentage de répartition.

Le faciès chloruré calcique se répand sur toute la plaine. Il tire son origine à partir des formations alluvionnaires et gypsifères, par échange de base entre sodium et le calcium.

Le faciès chloruré-sodique résulte des formations évaporitiques et il est aussi en fonction de la vitesse d'écoulement des eaux souterraines.

Le faciès bicarbonaté calcique provient des calcaires bordant la plaine.

4.2. Représentation graphique et identification des faciès.

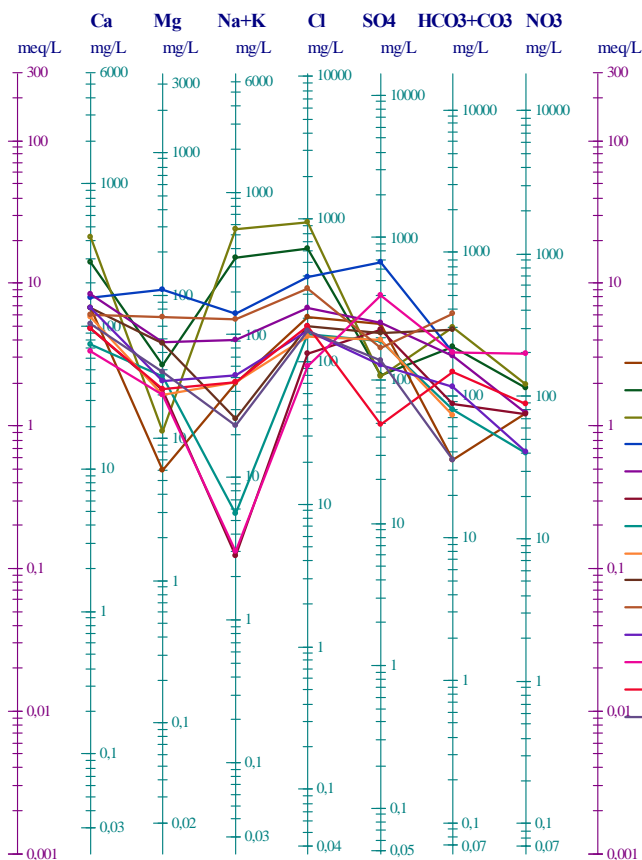
Pour une meilleure vision et une meilleure identification des faciès et de l'aspect qualitatif des eaux souterraines, ainsi que son évolution, la représentation graphique des résultats d'analyse, reste un outil incontournable.

Dans cet but, nous avons entrepris, dans notre cas cette démarche et choisi des diagrammes de représentation tels que celui de Schoeller-Berkaloff et Piper, afin de mieux cerner les particularités des eaux étudiées.

Ne perdons pas de vue, que de telles représentations, nous permettent une identification du ou des faciès qui caractérisent ces eaux.

4.2.1. Diagramme de SCHOELLER-BERKALLOF :

Ce type de représentation, établie par Schoeller et repris par Berkaloff, nous portons sur un semi logarithmique les quantités en réactions des anions et des cations sur l'axe des ordonnées et sur les abscisses les éléments chimiques à pas régulier, et ceci pour chaque point d'eau de prélèvement.



Le diagramme tracé pour la période d'octobre 2000 (fig.37), confirme principalement un faciès chloruré calcique, permettant de dire que la minéralisation des eaux est liée aux ions Cl^- et Ca^{2+} . Secondairement on observe un faciès sulfaté sodique.

Les fortes concentrations en chlorures et sulfates indiquent un état de pollution en rapport avec les activités anthropiques.

Les graphiques positionnés au milieu du graphique caractérisent la nappe Miocène alors que ceux en premier où les concentrations sont très élevées caractérisent les points d'eau se trouvant à l'exécutoire du bassin ce qui explique en quelque sorte les fortes teneurs en chlorures, en sulfates et en sodium.

Fig. 37- Diagramme de Scholler-Berkaloff. Octobre 2000

De la même façon, nous avons tracé les diagrammes correspondant aux autres campagnes, (juin 2002 et octobre 2003), où nous remarquons une nette différence entre les eaux à chaque campagne de prélèvement.

La vitesse d'écoulement dans l'aquifère conditionne cette situation, les faciès changent selon l'intensité de l'alimentation

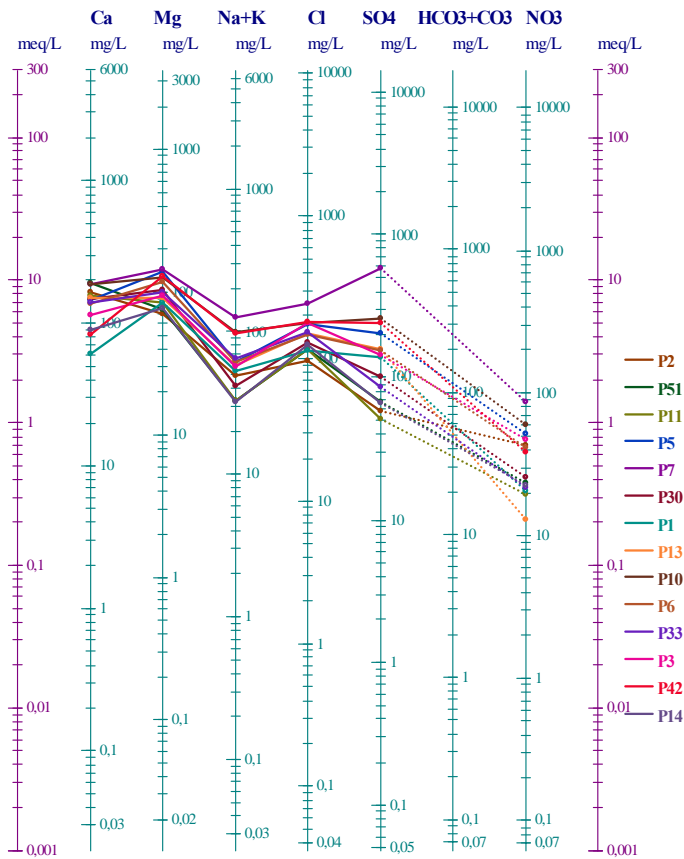


Fig. 37.1- Diagramme de Scholler-Berkalof. Juin 2002

Pour la période de juin 2002, le faciès dominant est sulfaté calcique à magnésien.

Le puits P7 présente une teneur élevée en sulfates, due à la mise en solution du gypse lié aux formations triasiques au Sud où il est implanté. Les nitrates présentent aussi des teneurs qui dépassent les normes témoignant ainsi l'apport anthropique vers la nappe.

Sur le diagramme il es claire que les points d'eau qui se situés au sud du terrain, présentent toujours des concentrations supérieurs a ceux de la nappe miocène dans les puits se trouvent entre les deux Failles F1 et F2.

On remarque aussi un regroupent des lignes relativement au mois d'octobre 2000. Mettant en évidence le phénomène de concentration où le faciès chloruré calcique est diminué par le faciès sulfaté magnésien.

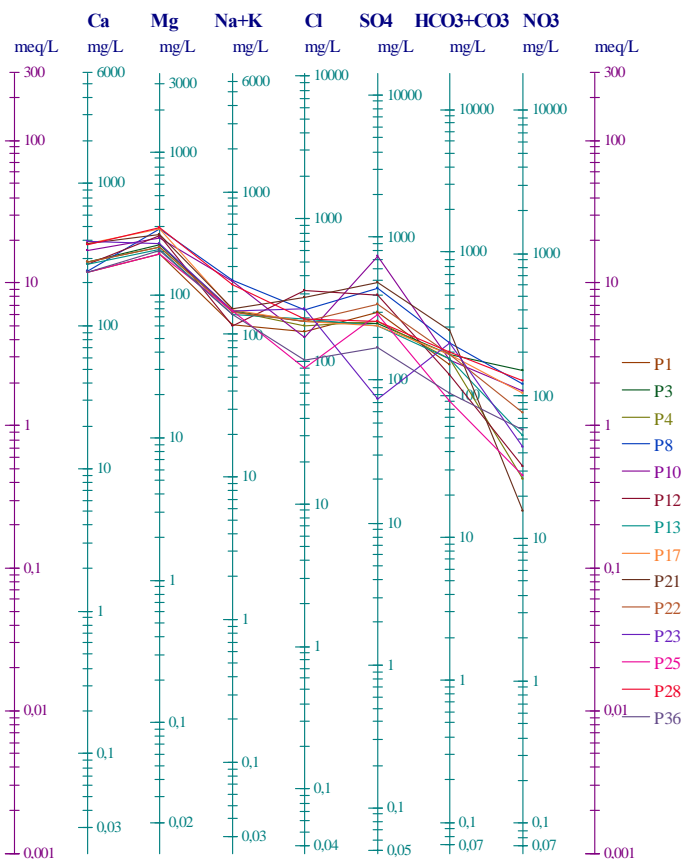


Fig. 37.2- Diagramme de Scholler-Berkalof. octobre 2003

En octobre 2003, plusieurs remarques sont à faire, les teneurs en nitrates sont toujours importantes et pour les mêmes raisons déjà signalées. Les eaux gardent le même faciès chimique, avec apparition du faciès sulfaté magnésien. (fig.37.2)

Les chlorures, et dans la plus part des cas tirent leurs origine des activités anthropiques que de la géologie.

Il est à noter qu'il n'existe pas de grandes variations entre les teneurs des eaux issues des puits de la nappe miocène et qui présentent par fois un faciès bicarbonatés calcique. Cette stabilité dans la composition chimique, en éléments qui tirent leur origine de la géologie, met en évidence l'alimentation de l'aquifère à partir des eaux qui lessive les formations calcaires des bordures ce qui confirme l'origine de l'alimentation de la nappe

4.2.2. Diagramme de PIPER :

Ce diagramme est un autre mode de représentation graphique et de classification d'une eau analysée. De forme triangulaire, il est subdivisé en trois zones de faciès (Fig. 38).

Les nuages de points concentrés dans une zone représentent pour les différents échantillons la combinaison des éléments cationiques et anioniques.

Sur le diagramme de Piper nous allons interpréter les résultats d'analyses hydrochimiques, correspondant aux périodes d'observations, pour avoir une idée sur le faciès chimique des eaux de la région et sur son évolution temporaire, ainsi que sur le mode d'acquisition de ce faciès.

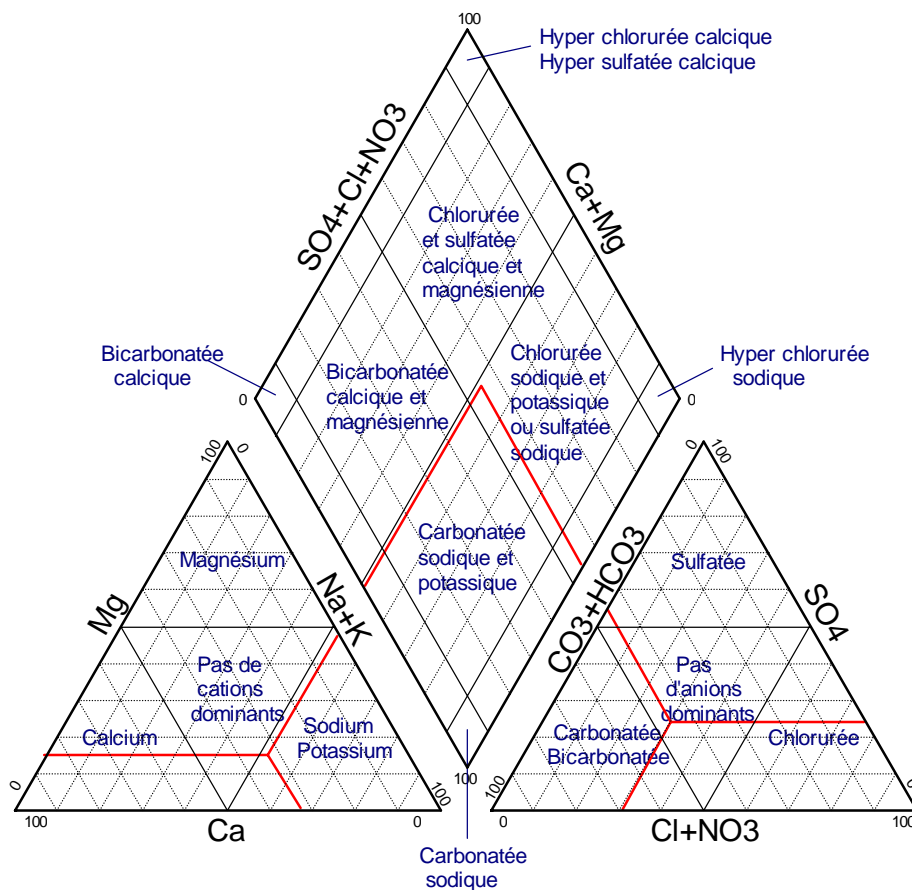


Fig. 38- Diagramme de Piper. Présentation générale

4.2.2.1. Période d'octobre 2000

Les puits représentés au milieu du triangle ne présentent pas de dominance. Ailleurs un enrichissement en chlorures et en sulfates est très net le reste des points d'eau a tendance à s'enrichir de plus en plus.

Les cations magnésiens et calciques, marquent la totalité les puits représentés sur le triangle des cations, traduisant ainsi l'origine de ces eaux. Le calcium provient des eaux des bordures, alors que magnésium tire son origine des argiles de la couverture du terrain

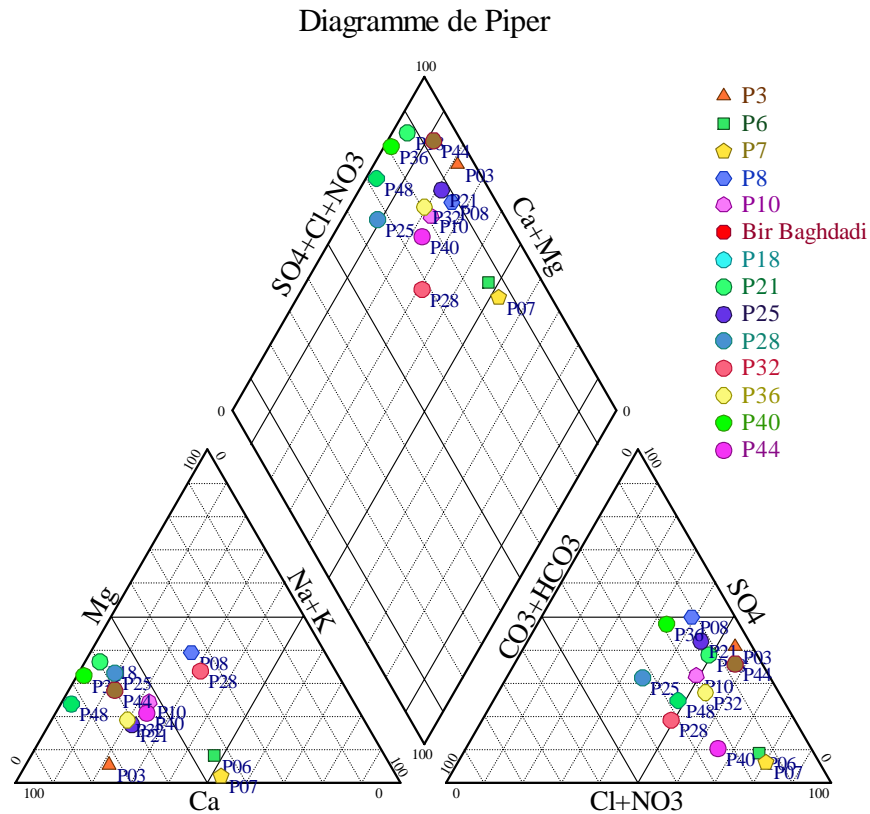


Fig. 38.1- Diagramme de Piper. Octobre 2000

Le diagramme met en évidence l'incidence de la géologie sur la qualité des eaux. Les bicarbonates tirent leur origine des formations des bordures, alors que les sulfates sont liés à la présence du Trias et de rejets au sud du terrain.

4.2.2.2. Période de Juin 2002

La campagne hydrochimique du mois de juin 2002 présente un scénario tout à fait différent du premier, le changement de faciès est clair, tous les points présentent des teneurs importantes en sulfates et en magnésium. (fig.38.2)

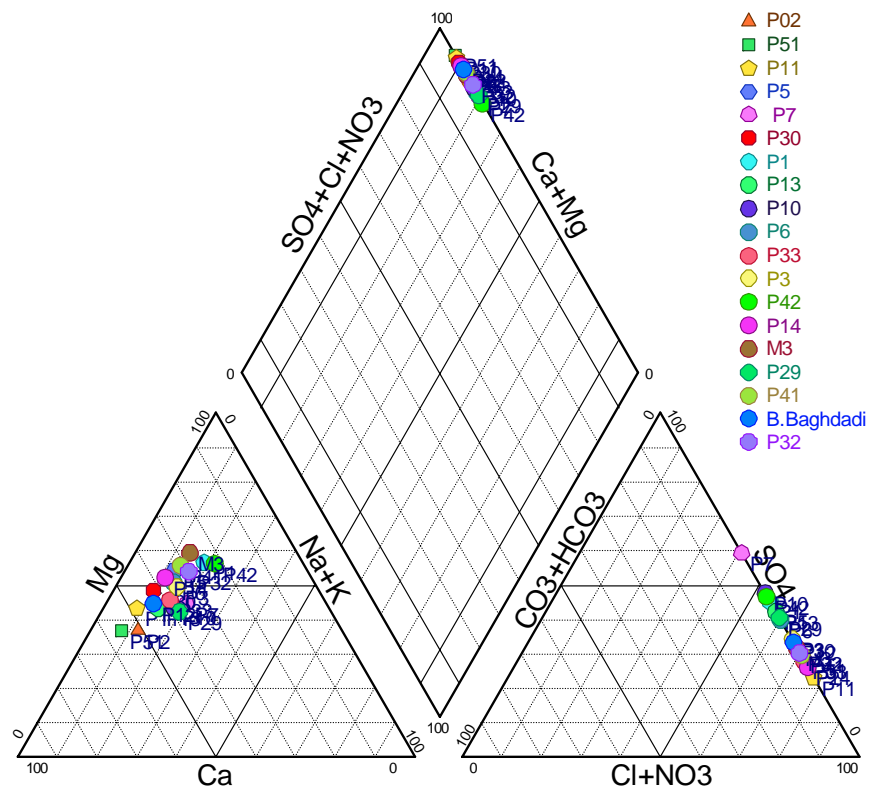


Fig. 38.2- Diagramme de Piper. juin 2002

Le diagramme global confirme le faciès signalé. Les sulfates en cette période d'observation sont liés aux activités anthropiques ; ils traduisent en effet l'état de contamination par la surface en plus de l'apport de la lithologie, parce que en cette période de l'année les températures sont élevées coïncident avec des pluies orageuses ce qui permet d'une part la dissolution et d'autre part la concentration en ces deux éléments

4.2.2.3. Période d'octobre 2003

La répartition des anions pour cette période (octobre 2003) met en évidence une dynamique différente des autres périodes. Ceci traduit le mode d'acquisition du chimisme, les chlorures présentent des teneurs assez importantes

Les cations présentent le même scénario pour la période précédente, le magnésium domine.

Le diagramme global confirme aussi, en cette période, l'incidence de la géologie sur la qualité des eaux. Les bicarbonates tirent leur origine des formations des bordures, alors que les sulfates et chlorures sont liés à l'activité anthropique.

Diagramme de Piper

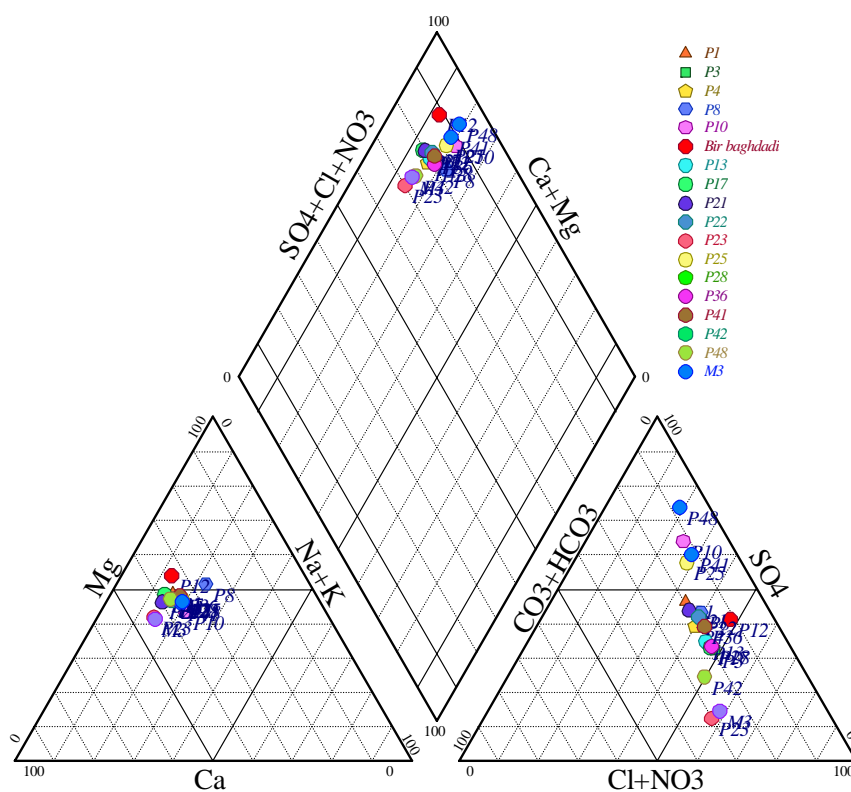


Fig. 38.3- Diagramme de Piper. Octobre 2003

5. CARTOGRAPHIE HYDROCHIMIQUE :

L'outil cartographique, même dans l'aspect qualitatif des eaux, reste un outil très appréciable, dans la vision de l'évolution spatiale d'un constituant chimique quelconque, ou d'un polluant. A cet effet, nous avons dans notre cas, choisi également ce mode de représentation, pour la variabilité des éléments chimiques qui ont le plus de rapport avec le présent sujet de thèse.

Pour les périodes d'observation nous avons tracé les cartes des éléments qui paraissent les plus inquiétants du point de vue qualité et pollution.

5.1. LES CHLORURES.

L'ion chlorure est un très bon indicateur de pollution de surface dans les régions éloignées de la mer. Les faibles profondeurs du plan d'eau et la nature lithologique de la couverture (argile sableuse) de la nappe sont en faveur des teneurs enregistrées lors des différentes campagnes de terrain. Dans ce qui suit nous allons observer la répartition de cet élément dans l'espace selon la chronologie d'échantillonnage.

5.1.1. Carte des chlorures. Octobre 2000 :

Les concentrations en chlorures pour cette période, suivent le sens d'écoulement. Elles sont faibles aux bordures, et se concentrent au centre et au sud à l'exécutoire du bassin.

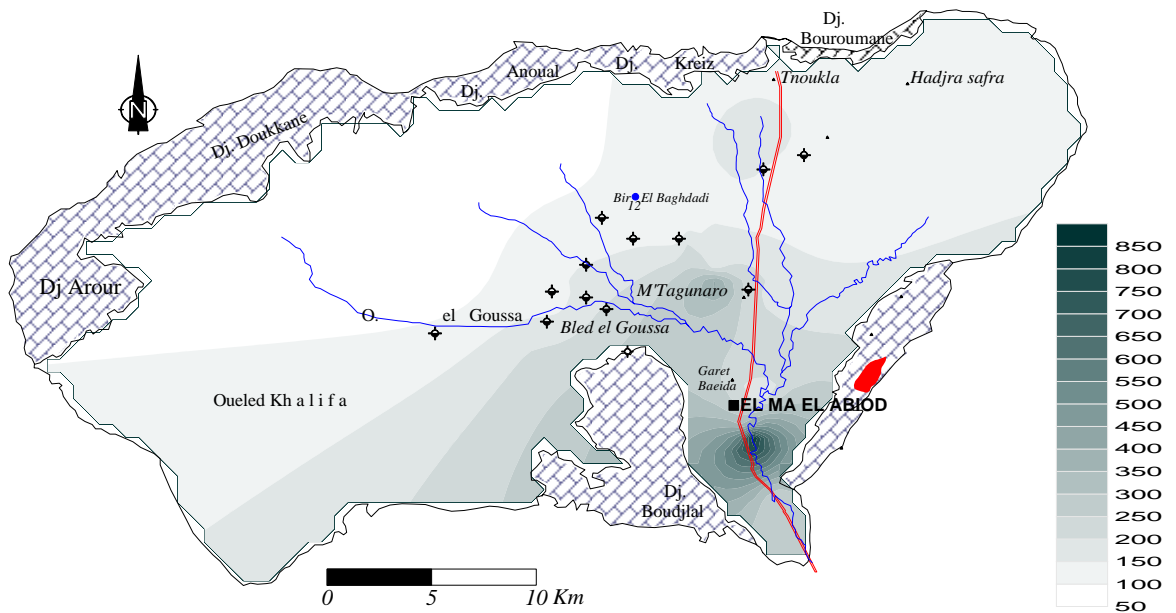


Fig. 39 – Carte des Chlorures. Octobre 2000 (mg/l)

En deux endroits, les chlorures présentent des teneurs supérieures à la norme (250 mg/l) le première au centre à M'Tagunaro et le seconde au sud de la ville, là où l'oued présente une forme de méandre.

5.1.2. Carte des chlorures. juin 2002 :

La même constatation est valable que pour la période précédente, là aussi les concentrations en chlorures sont élevées, notamment au centre et au sud.

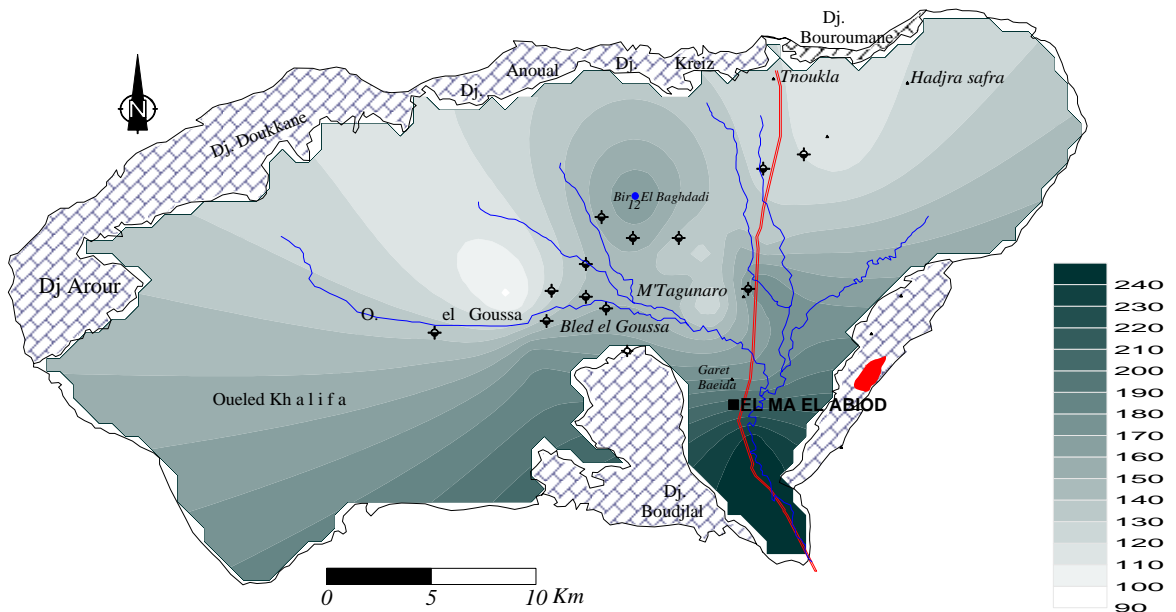


Fig. 39.1 – Carte des Chlorures. Juin 2002 (mg/l)

La zone de Bir El Baghdadi présente de fortes teneurs, dues principalement à la qualité des eaux des puits abandonnés.

5.1.3. Carte des chlorures. *Octobre 2003*

Trois secteurs présentent de fortes teneurs en chlorures. Il s'agit de la zone Est à proximité du forage M3, de la zone centrale et l'Ouest de la plaine où se trouvent des affleurements de grès.

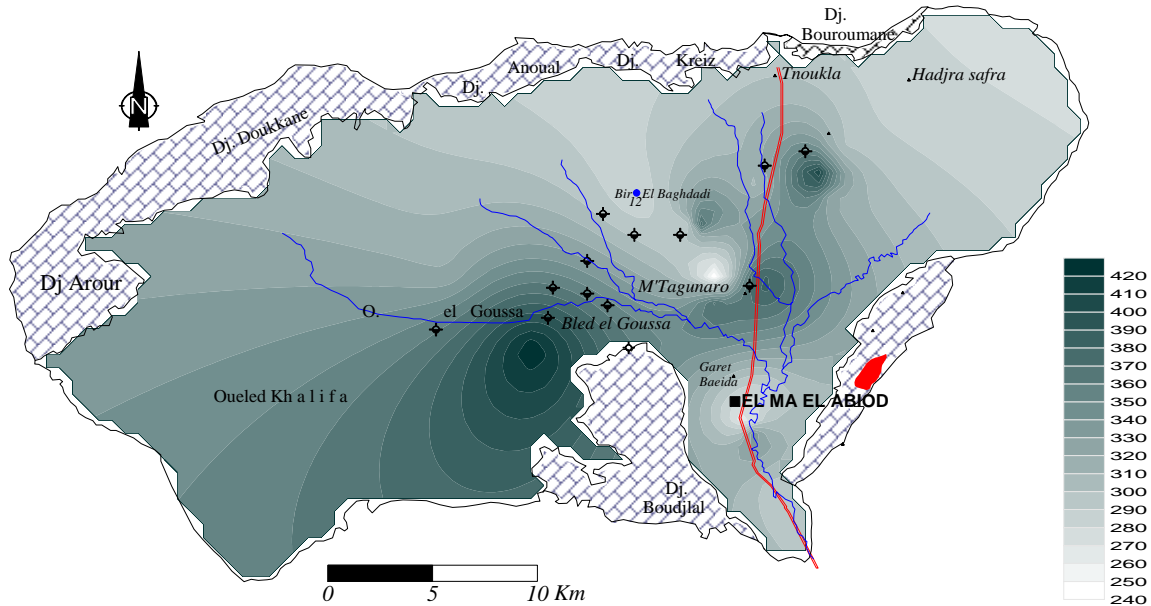


Fig.39.2 - Carte des Chlorures. Octobre 2003 (mg/l)

5.1.4. Carte des chlorures. *Mars 2004*

En mars 2004, les concentrations en chlorures sont dans les normes, elles sont toutes inférieures à 250mg/l. Une teneur de 215mg/l a été enregistrée du coté sud-est de la plaine.

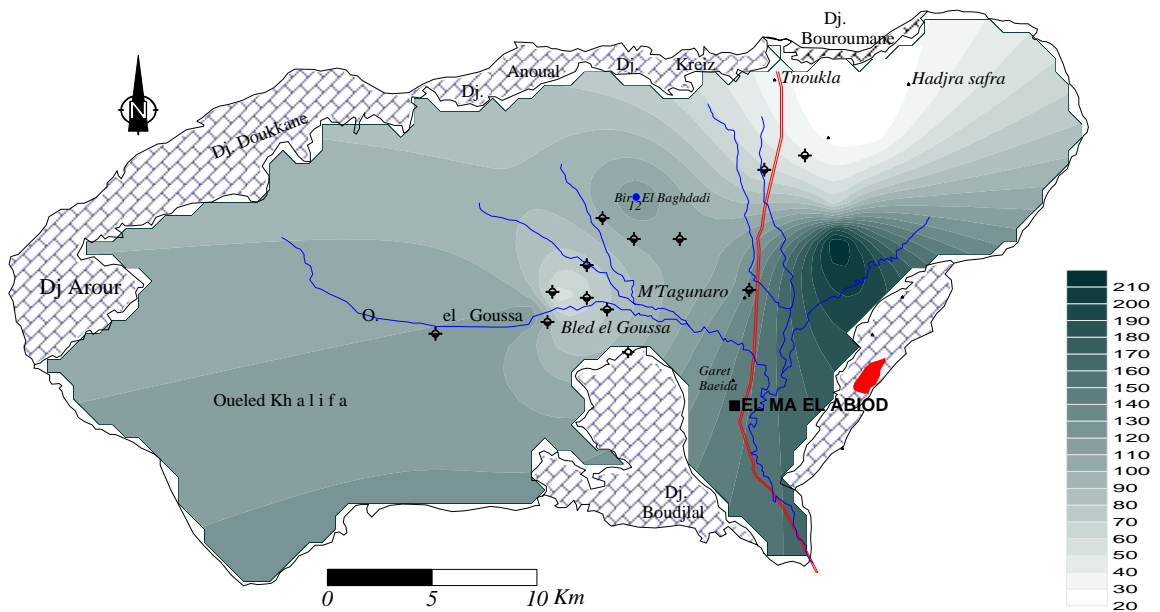


Fig. 39.3 - Carte des Chlorures. Mars 2004 (mg/l)

5.2. CARTOGRAPHIE DES SULFATES

5.2.1. Carte des sulfates. *Octobre 2000*

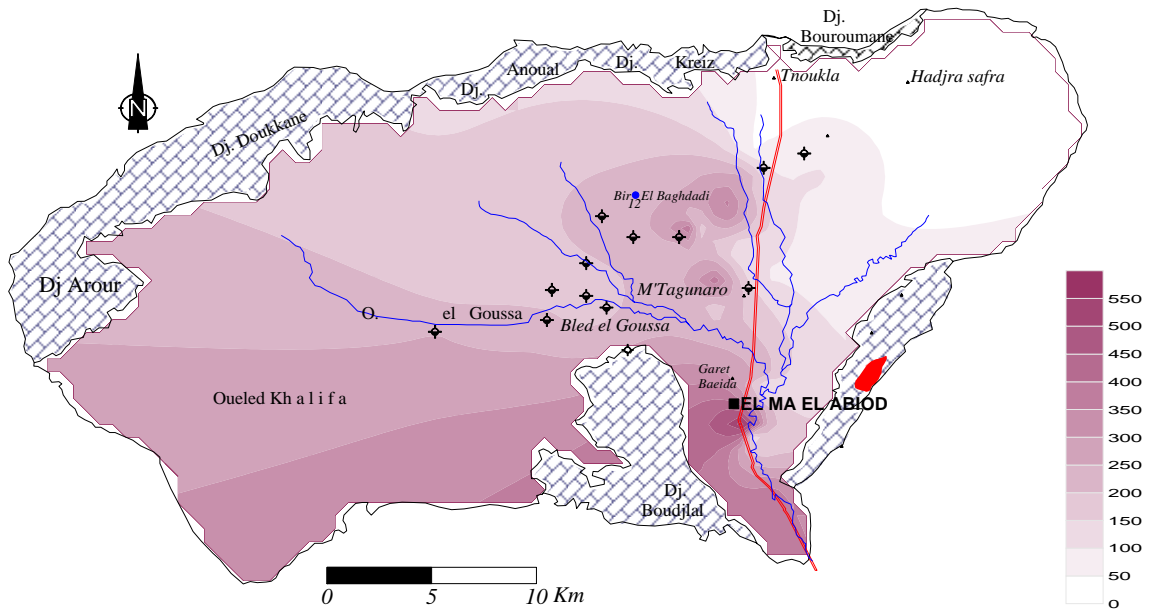


Fig. 40 - Carte des Sulfates. Octobre 2000 (mg/l)

Les fortes concentrations en sulfate se manifestent au centre et au sud de la plaine, avec des teneurs qui dépassent les 500 mg/l. (fig.40)

5.2.2. Carte des sulfates. *Juin 2002*

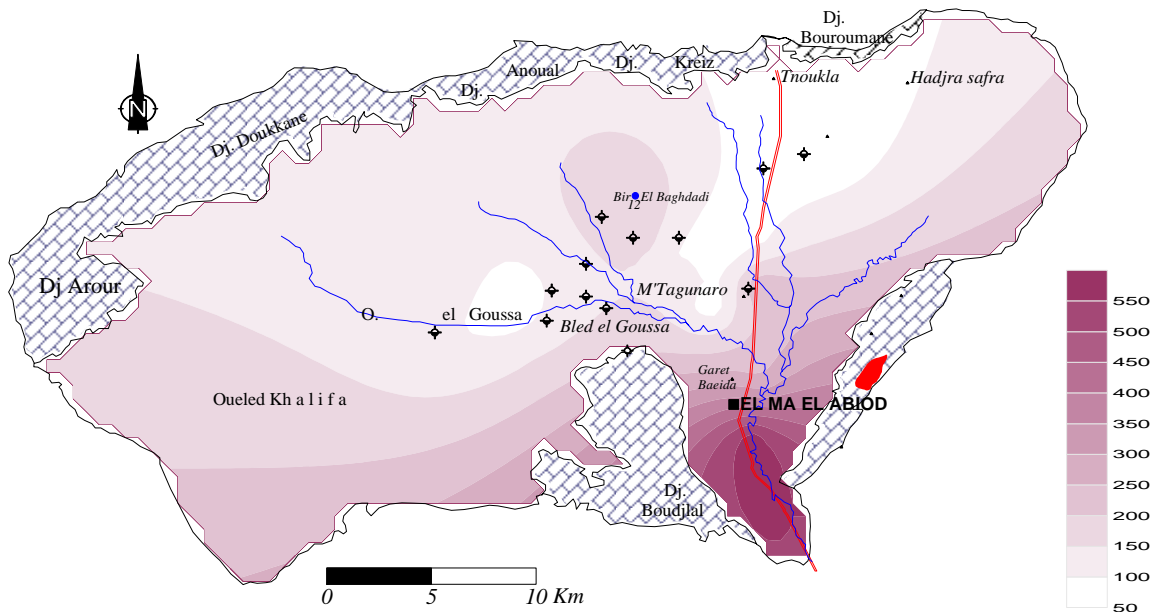


Fig. 40.1 - Carte des Sulfates. Juin 2002 (mg/l)

Sur la carte de juin 2002, (fig. 40.1) les fortes concentrations en sulfates sont localisées dans le secteur sud de la plaine. Elles sont liées à l'existence de formations triasiques gypseuses.

5.2.3. Carte des sulfates. Octobre 2003

En octobre 2003, les sulfates offrent un scénario différent de celui des campagnes précédentes. En effet, les fortes concentrations se localisent à l'Est, au centre (Bir el Baghdadi) et au Sud. Ces fortes teneurs sont liées, en plus de la présence de formations gypsifères comme dans la partie sud, à l'augmentation de l'évapotranspiration en cette période d'été, ce qui augmente la concentration des sels dissous dans l'eau, notamment les sulfates, dont la teneur peut varier du simple au double entre les périodes de hautes et de basses eaux. (fig.40.2)

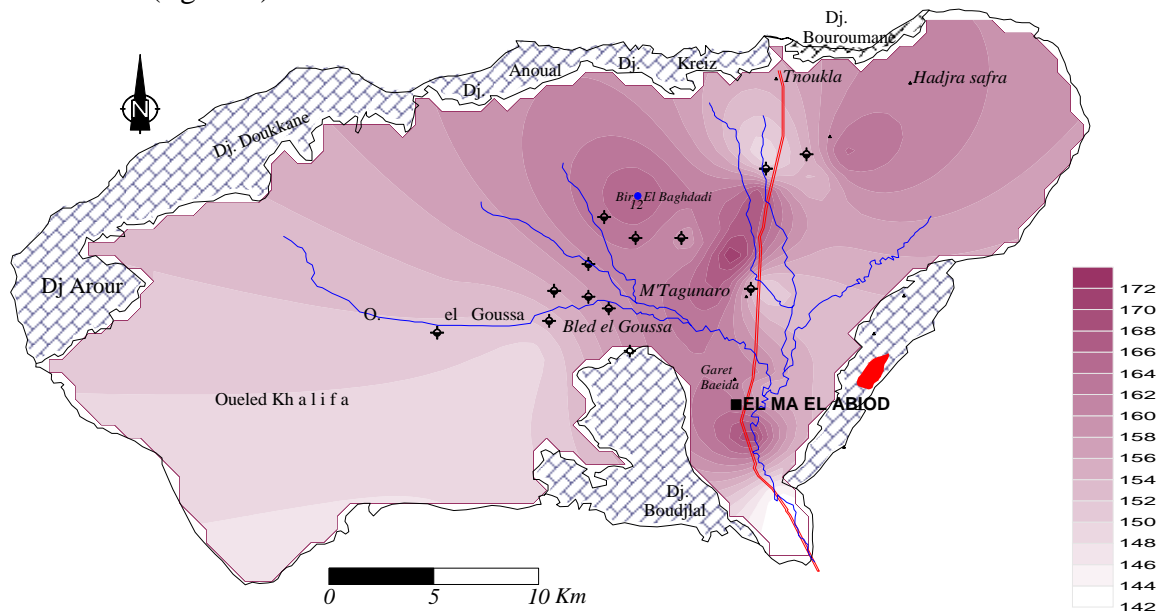


Fig. 40.2- Carte des Sulfates. Octobre 2003 (mg/l)

5.2.4. Carte des sulfates. Mars 2004

En 2004 les concentrations élevées en sulfates changent de position et restent importantes (fig.40.3). Il est clair, que ces concentrations sont entraînées par l'écoulement : elles ont doublé et confirment la variation entre les deux périodes (hautes et basses eaux)

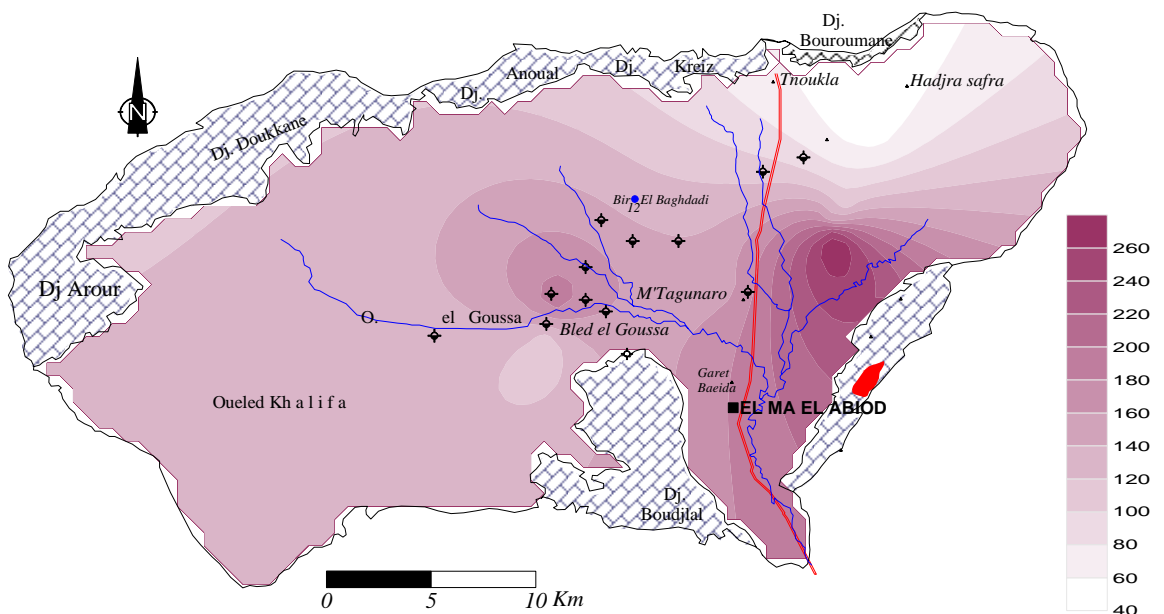


Fig. 40.3 - Carte des Sulfates. Mars 2004 (mg/l)

6. ORIGINE DU CHIMISME DES EAUX DU SYSTEME AQUIFERE

A partir des résultats des analyses chimiques, des graphiques et des cartes, on peut, en se basant sur les précédents chapitres, déduire l'origine du chimisme du système aquifère.

L'alimentation du système est tributaire de la pluviométrie, donc de l'infiltration des pluies, notamment dans la zone Nord-Est où les sables affleurent ou encore sous faible couverture alluviale.

L'influence des formations géologiques sur la nature des faciès est nettement remarquable : les calcaires ont donné le faciès bicarbonaté calcique confirmant ainsi l'alimentation de la nappe latéralement.

Les argiles et les marnes ainsi que les formations triasiques ont donné les faciès chloruré calcique et chloruré-sodique et ce par lessivage, par évaporation et par échange de base.

La piézométrie a favorisé la naissance de ces faciès, car les eaux souterraines s'écoulent suivant la direction Nord-Sud et se chargent progressivement au fur et à mesure qu'on se déplace vers le centre de la plaine, constituant une zone d'accumulation. Ceci explique les fortes concentrations observées dans ce secteur qui engendrent la prédominance des faciès chlorurés calciques.

La variation des éléments chimiques et leur influence sur la prédominance des faciès, ainsi que les corrélations inter-éléments, nécessitent une étude statistique dont les caractéristiques s'adaptent mieux avec l'évolution des éléments analysés.

7. DETERMINATION DES APPORTS

7.1. Les apports anthropiques

Vu les fortes activités humaines, urbaine, industrielle et agricole qui se développent dans la région d'étude, plusieurs apports de contamination ont été détectés : l'un d'origine anthropique dû aux rejets directs d'eau usée, au stockage des produits industriels et à l'utilisation des produits chimiques dans l'agriculture (épandage pendant la période de semence en automne), et l'autre d'origine naturelle, à savoir, la salinité, due essentiellement à l'effet des évaporites. L'ensemble de ces apports induisent une pollution chimique ou provoquent l'augmentation de la concentration des éléments chimiques dans les eaux souterraines, ce qui conduit à une dégradation de leur qualité.

7.2. Les rejets (eaux usées, poussières)

- **Rejets urbains** : ils sont principalement liés aux rejets des Méchtats (regroupements familiaux sur la plaine) où les réseaux d'assainissement sont absents et ce qui induit des apports caractérisés par de fortes teneurs en ammonium et en phosphates.

- **Rejets industriels** : ils sont représentés uniquement par les rejets dans l'atmosphère, de l'usine de ciment située à M'Taguinaro, caractérisée par une grande diversité de la composition chimique. Il faut savoir en outre, que le gypse constitue un stock important à ciel ouvert, pour cette industrie. Malheureusement, nous n'avons pas pu réaliser un échantillonnage de ces poussières dans l'atmosphère.

7.3. Les apports naturels

Ils jouent un rôle primordial dans l'acquisition des éléments chimiques par les eaux, par la dissolution des formations géologiques, mais ne forment pas une origine de pollution (Castany 1982). Le danger de ce processus apparaît lorsque les concentrations de ces éléments dépassent les limites de potabilité, phénomène très répandu dans les régions semi-arides. Dans la plaine d'El ma El Abiod, on détecte une seule origine principale responsable de l'augmentation de ces éléments chimiques, à savoir *la dissolution des formations évaporitiques*, notamment au centre (M'Taguinaro à l'Est de la route nationale) et au sud de la plaine. On observe à ce niveau une dissolution rapide des éléments évaporitiques Na^+ , Ca , Sr^+ , Cl^- , et SO_4^- , ces derniers étant responsables d'une augmentation importante de la salinité des eaux, confirmée par les valeurs de la conductivité.

7.4. Cartographie de la conductivité (fig.41)

La conductivité électrique est liée à la présence des espèces ioniques en solution. Les valeurs de mesure de ce paramètre (in situ) pendant le mois d'avril 2003 montrent un dépassement de la norme recommandée pour les eaux d'alimentation en eau potable. Elle est très élevée au centre et au sud de la plaine, ce qui confirme les explication de l'origine du chimisme, lors des l'interprétations des cartes précédentes

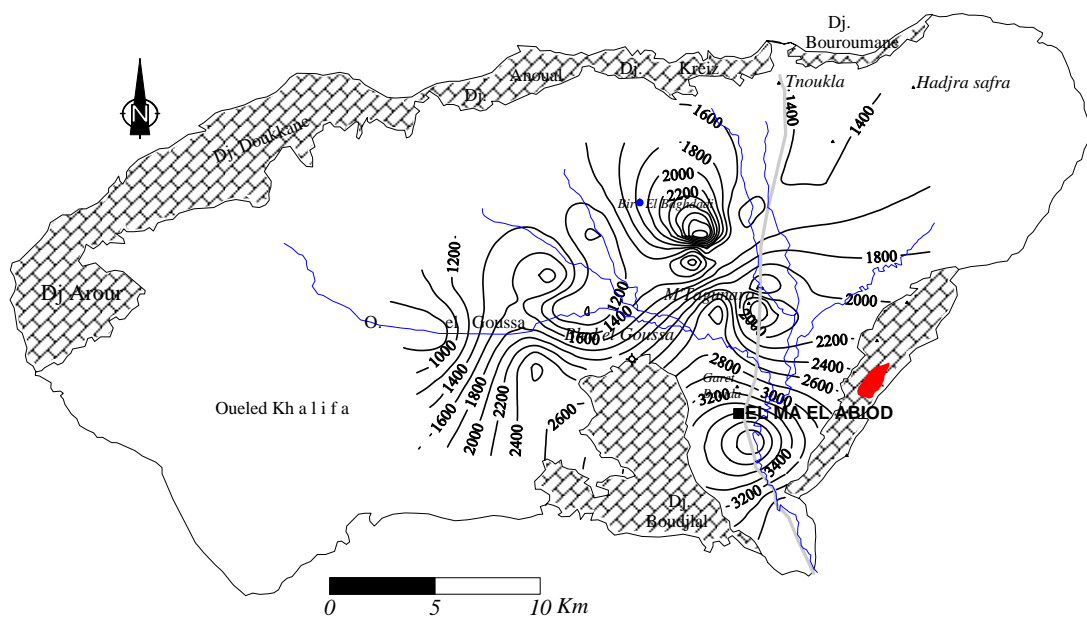


Fig.41- Carte des Conductivités. Avril 2003

8. QUELQUES ELEMENTS DE GEOCHIMIE

8.1. LE STRONTIUM

Le strontium est le seul élément trace qui est couramment utilisé pour l'étude des eaux souterraines (Meybek, 1974 ; Starinski et all. 1983 ; Bakalovicz 1988 ; Hsissou 2002), L'analyse de la variation spatiale des concentrations en strontium permet de déterminer l'origine évaporitique des eaux souterraines. Dans la nature le strontium est présent surtout

dans les roches volcaniques et évaporitiques (Bakalovicz 1994). Dans les évaporites, il s'y rencontre sous forme de célistite (SrSO_4), minéral souvent associé au gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Il peut remplacer le calcium dans la structure cristalline des minéraux carbonatés, car ces deux éléments possèdent des rayons ioniques très voisins.

Le strontium est un bon indicateur de l'origine du soufre dans les eaux sulfatées, car l'oxydation des composées soufrés libère du soufre mais ne s'accompagne pas d'une mobilisation du strontium (Bakalovicz 1994). Le rapport des concentrations molaires du strontium sur celles du calcium dans les eaux souterraines est caractéristique du type d'évaporites. Ce rapport est toujours supérieur à 1% pour les formations évaporitiques (Meybek, 1984), il permet d'identifier les circulations souterraines et de distinguer leurs origines.

L'utilisation de ce rapport est d'un intérêt important pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes souterrains, dans les régions semi-arides, étant donné que les formations évaporitiques y sont largement répandues

8.1.1. Cartographie du strontium

Les fortes concentrations en strontium se localisent au sud du terrain (fig. 42), elles tirent leur origine des formations gypsifères de bordure, l'effet de l'écoulement souterrain est bien visible, puisqu'elles suivent ce dernier.

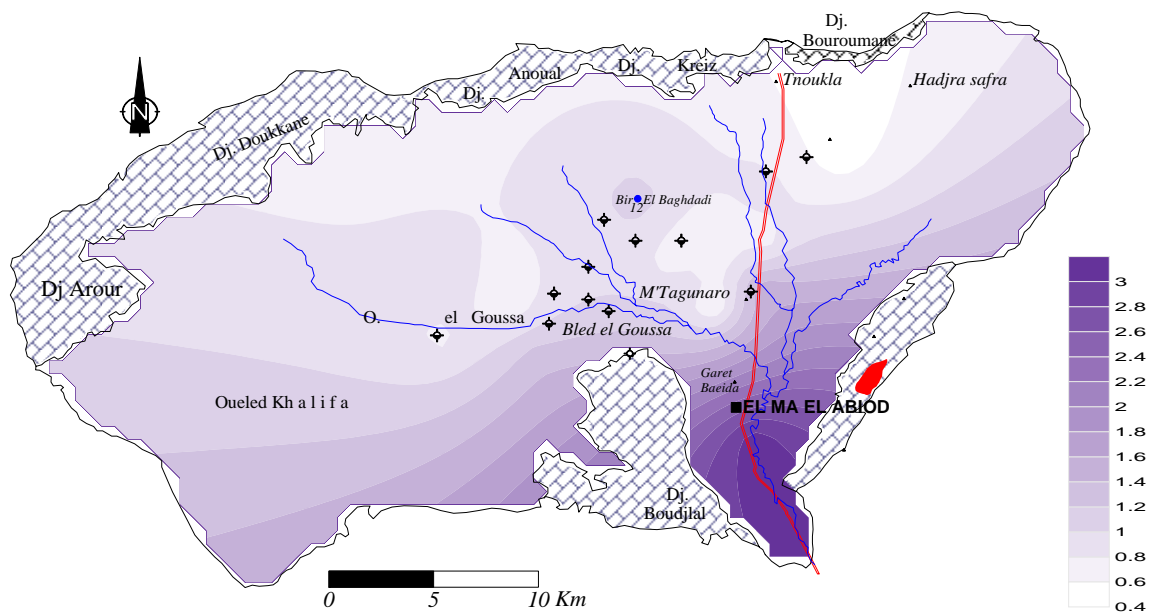


Fig. 42 – Carte de strontium. Juin 2002 (mg/l)

Cette répartition confirme l'origine des sulfates, les deux cartes (SO_4^{2-} et Sr^{2+}) présentent la même allure.

8.1.2. Evolution du strontium

Pour pouvoir examiner les sources de provenance du strontium, ainsi que son évolution dans l'espace, une carte de répartition a été tracée sur la base des résultats

d'analyses effectuées au laboratoire de chimie de l'EUDIL et de l'institut de chimie de l'Université de Lille (France), présentés dans le tableau n°28.

Puits 2002	Sr ²⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Sr ²⁺ /Ca ²⁺	Puits 2005	Sr ²⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Sr ²⁺ /Ca ²⁺
P02	0.67	163	1.88	P02	1.93	160.8	12
P51	0.48	192	1.14	P01	4.22	164.5	5.37
P11	0.49	156	1.44	P3	2.74	186.4	6.72
P05	1.09	143	3.49	P04	1.71	181.3	4.31
P07	3.12	186	7.67	P05	0.66	83.3	3.62
P30	0.63	148	1.95	P06	0.71	97.5	3.28
P01	0.91	61	6.82	P07	0.77	93.3	3.78
P13	0.84	151	2.54	P08	0.93	110.7	3.84
P10	2.25	188	5.47	P09	0.87	94.3	4.22
P06	1.04	137	3.47	P10	0.93	117.5	3.62
P33	0.78	139	2.57	P11	0.65	91.9	3.24
P03	1.29	114	5.18	P12	0.78	100.3	3.56
P42	1.52	84	8.28	P13	0.53	76.3	3.18
P14	0.62	90	3.15	P14	0.69	93.1	3.39
M3	0.77	67	5.26	P15	0.77	96.3	3.66
P29	1.47	122	3.33				
P41	0.9	86	4.79				
P12	0.75	177	1.94				
P32	0.82	84	4.47				

Sr²⁺/Ca²⁺ ‰ : Concentrations molaires

Tab. 28 – Résultats d'analyses du calcium et du strontium (2002 et 2005)

Les rapports élevés (supérieur à 1‰) au sud et à l'ouest traduisent une dissolution des formations évaporitiques en ces endroits, bien qu'à l'ouest c'est l'alimentation qui amène ces concentrations vers ces endroits. (fig.43)

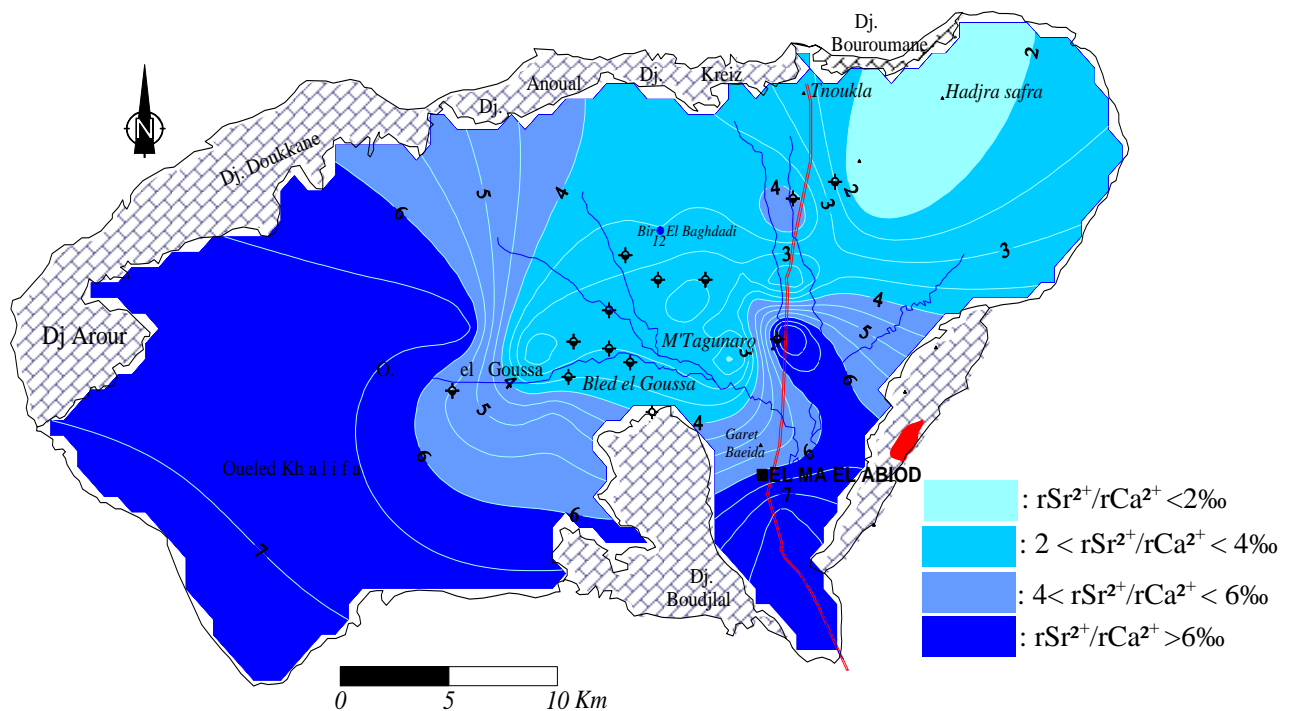


Fig. 43 – Carte des concentrations molaires du rapport Sr²⁺/Ca²⁺

8.2. LES NITRATES

8.2.1. Le cycle de l'azote à l'échelle de la parcelle

Le cycle de l'azote dans les sols est marqué par différents processus dont les effets cumulés conduisent ou non à maintenir un excès d'azote dans les sols, et à le rendre disponible pour le lessivage (fig.44). L'azote dans les sols provient principalement de la fixation de l'azote atmosphérique, du dépôt de l'azote contenu dans les précipitations, de amendements organiques et des apports d'engrais de synthèse. La fixation libre par des bactéries aérobies ou anaérobies contribue à maintenir un stock d'azote de 10 à 30 kg.ha⁻¹, l'apport d'azote par la fixation symbiotique des espèces légumineuses variant entre quelques dizaines à plusieurs centaines de kg.ha⁻¹, selon les conditions de PH, d'humidité et de teneurs en nitrates (Recous et al., 1990). Les apports d'azote sous forme organique dans les sols se font par amendements anthropiques (fumier, etc...), restitution au sol des résidus de culture et/ou restitution des déjections animales. La constitution du stock d'azote minéral dans le sol est issue des apports d'engrais de synthèse, sous forme d'ammonium, de nitrates et d'urée.

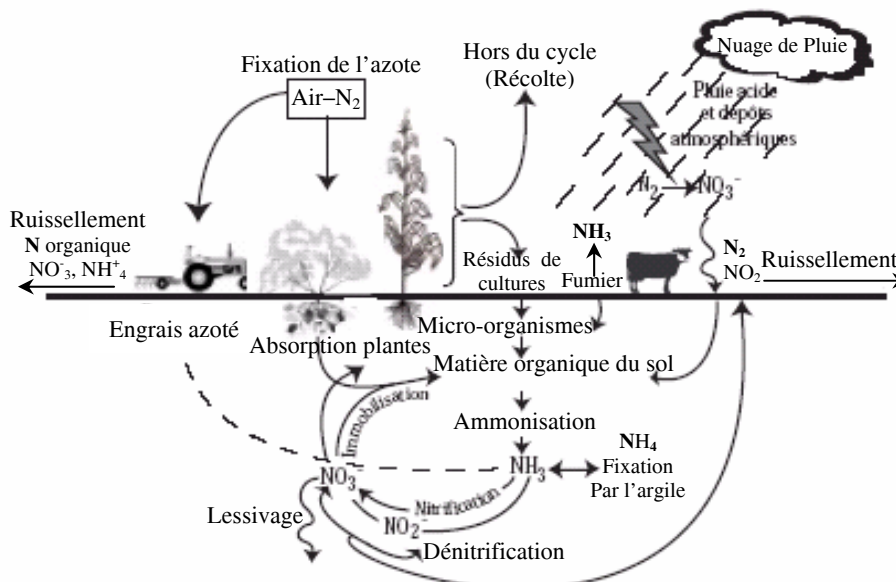


Fig.44– Le cycle de l'azote dans le sol. D'après Recous et al. (1997)

L'effet des processus internes au cycle de l'azote peut être dominant par rapport aux modifications induites par les processus externes (Webb et Walling, 1985). Les processus internes interagissent avec les processus externes au cycle de l'azote, contrôlant le stock et les formes de l'azote contenu dans le sol, quelle que soit l'origine de ce dernier (fig. 44.1).

La minéralisation ou ammonification correspond à la dégradation de la matière organique, conduisant à la production d'ammonium (NH_4^+). La minéralisation est d'autant plus forte que les apports sont importants, elle est maximale au printemps et à l'automne lorsque les températures sont douces et le sol humide.

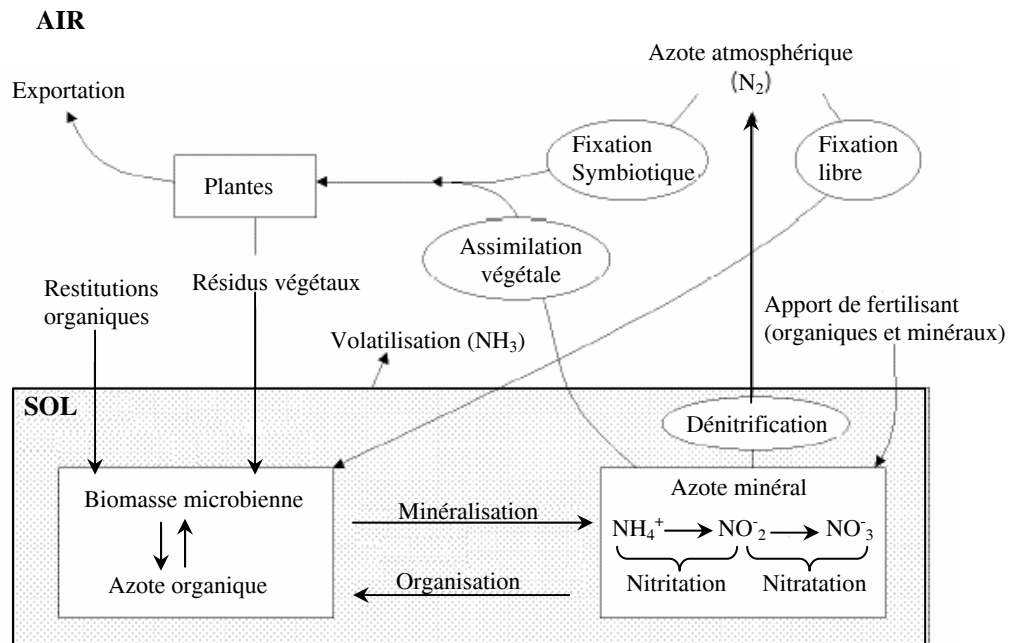


Fig.44.1 – Le cycle de l’azote dans le sol. D’après Recous et al. (1997)

En l’absence de pollution, les eaux souterraines présentent très souvent des teneurs très faibles en nitrates, de l’ordre du mg/l. Cependant l’accroissement de l’élevage et de l’agriculture, fait que la contamination des eaux souterraines devient néfaste, surtout si les conditions naturelles climatiques et hydrogéologiques, piézométrie, perméabilité, pluviométrie, sont favorables à l’intrusion de cette pollution. La pollution parcellaire est la forme la plus redoutable en matière de pollution, notamment dans les régions à vocation agricole où toutes les conditions de ce type d’activité sont disponibles. C’est à cet effet que nous avons examiné au paragraphe précédant le cycle parcellaire des nitrates.

8.2.2. Cartographie de la répartition des nitrates

Sur les neuf campagnes de prélèvement, une grande importance a été réservée à cet élément, nous étions au départ dans l’absolue certitude que l’intensité de l’élevage et de l’agriculture pratiquée en cette région de la wilaya, n’arriverait jamais à marquer sa présence, mais les résultats des analyses ont montré le contraire. Pour cette raison, nous allons examiner à travers une cartographie la répartition spatiale de cet élément.

8.2.2.1. Carte des Nitrates. Octobre 2000

Les concentrations en nitrates sont élevées, elles dépassent les normes de potabilité (> 50 m/l). Les teneurs les plus importantes se localisent au nord et au sud. Dans ces secteurs l’utilisation des engrais et des fumiers est très importante pour la préparation des parcelles. Au contraire, les teneurs en nitrates sont plus faibles au centre de la plaine (fig.45), à cause du pompage pratiqué en ces endroits.

Cette interprétation est confirmée par nos enquêtes de terrain qui coïncident généralement avec les campagnes piézométriques et hydrochimiques.

Les conditions réductrices ne sont pas prédominantes en cette période de l’année, les sols se labourent et donc ils vont être très bien aérés.

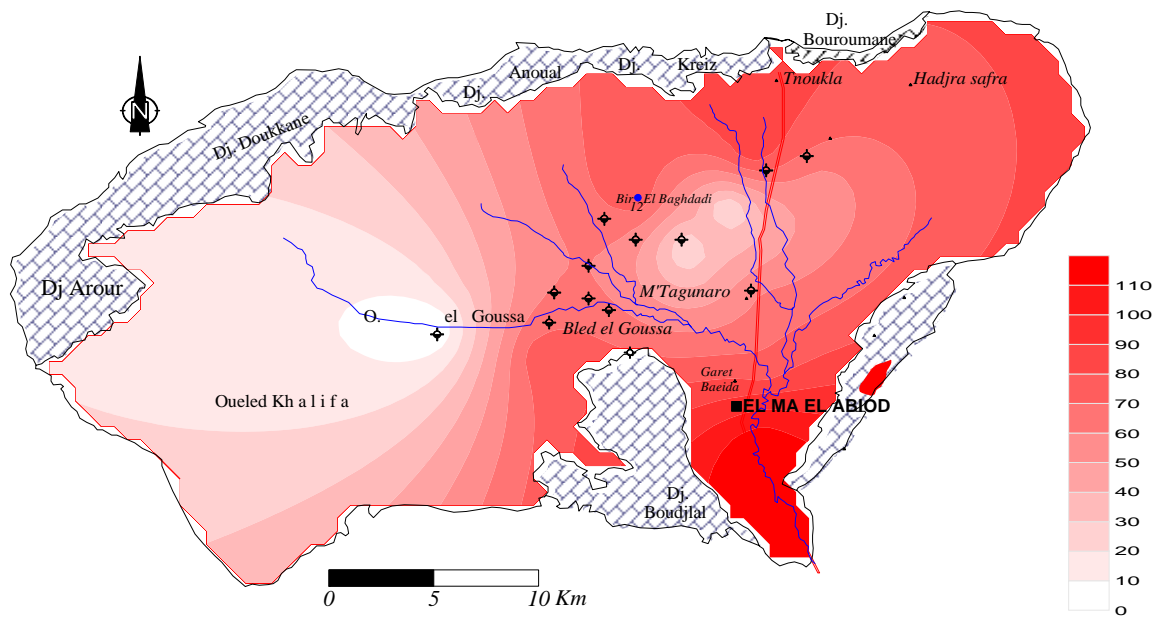


Fig. 45 - Carte des Nitrates. Octobre 2000

8.2.2.2. Carte des Nitrates. Juin 2002 (fig.45.1)

En juin 2002, les teneurs en nitrates ne se répartissaient pas de la même manière que pendant le mois d'octobre 2000, cette fois-ci, elles sont élevées et dépassent les normes au sud de la plaines, ce qui peut être expliqué par la nature des eaux usées drainées par l'oued El Ma El Abiod. Des concentrations de l'ordre de 45mg/l se localisent autour de Bir el Baghddi, un ancien puits abandonné creusé dans la nappe alluviale.

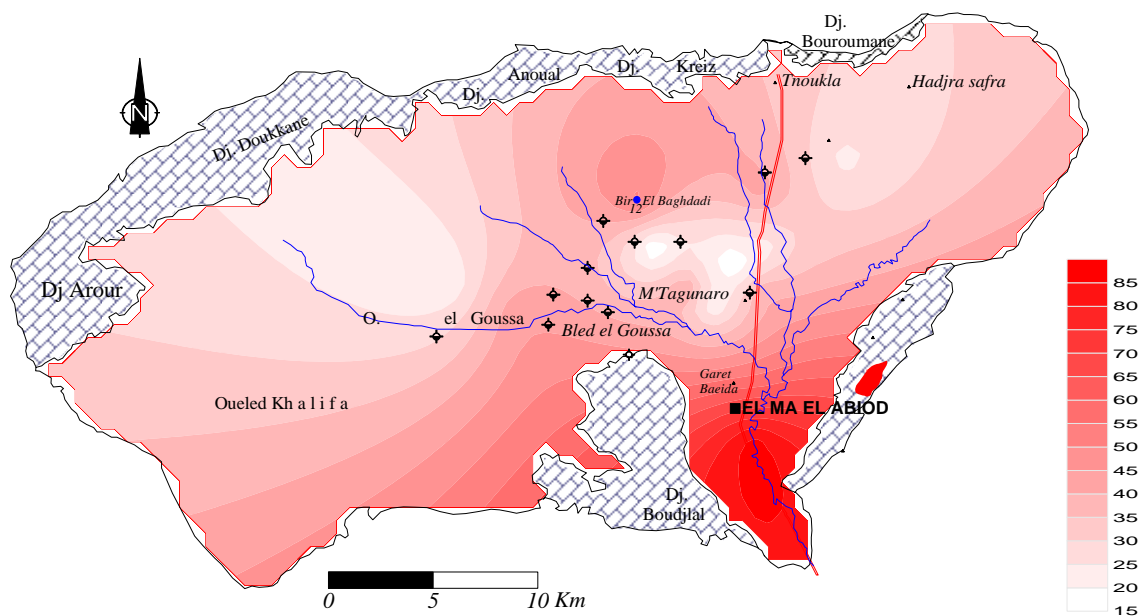


Fig. 45.1 - Carte des Nitrates. Juin 2002

8.2.2.3. Carte des Nitrates. Octobre 2003(fig.45.2)

Les concentrations en cette période sont très alarmantes, les précipitations ont été faibles et n'ont pas permis le drainage des eaux d'irrigation, ce qui a fait que sur toute la plaine les teneurs sont supérieures à la norme. Cette situation est due principalement à l'utilisation anarchique des engrais sur un sol qui n'arrive pas à assimiler les quantités introduites.

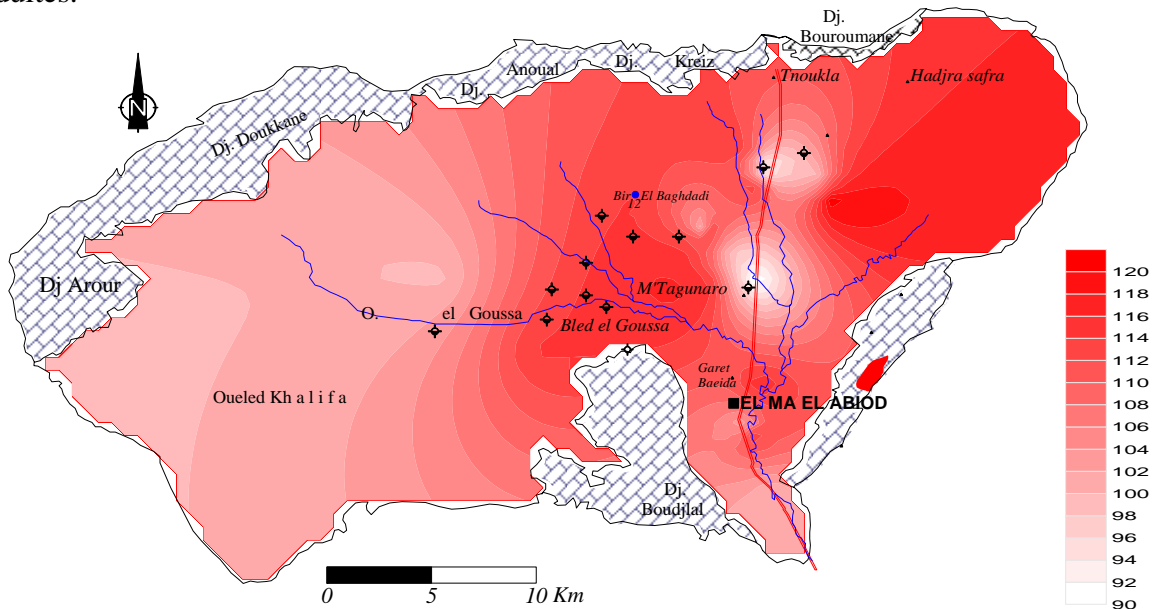


Fig. 45.2- Carte des Nitrates. Octobre 2003

8.2.2.4. Carte des Nitrates. Mars 2004 (fig.45.3)

En cette période de l'année (mars 2004) l'effet des précipitations, ainsi que celui du sens de l'écoulement, est très net et influe sur les teneurs élevées en nitrates. Ces concentrations élevées apparaissent d'abord au Nord, puis sont entraînées par la suite jusqu'à l'exutoire du bassin au Sud, par analogie aux autres campagnes. C'est uniquement le secteur Ouest qui garde des concentrations élevées, du fait que dans cette région, l'écoulement qui s'effectue en direction du centre de la plaine est faible (cf. Piézométrie)

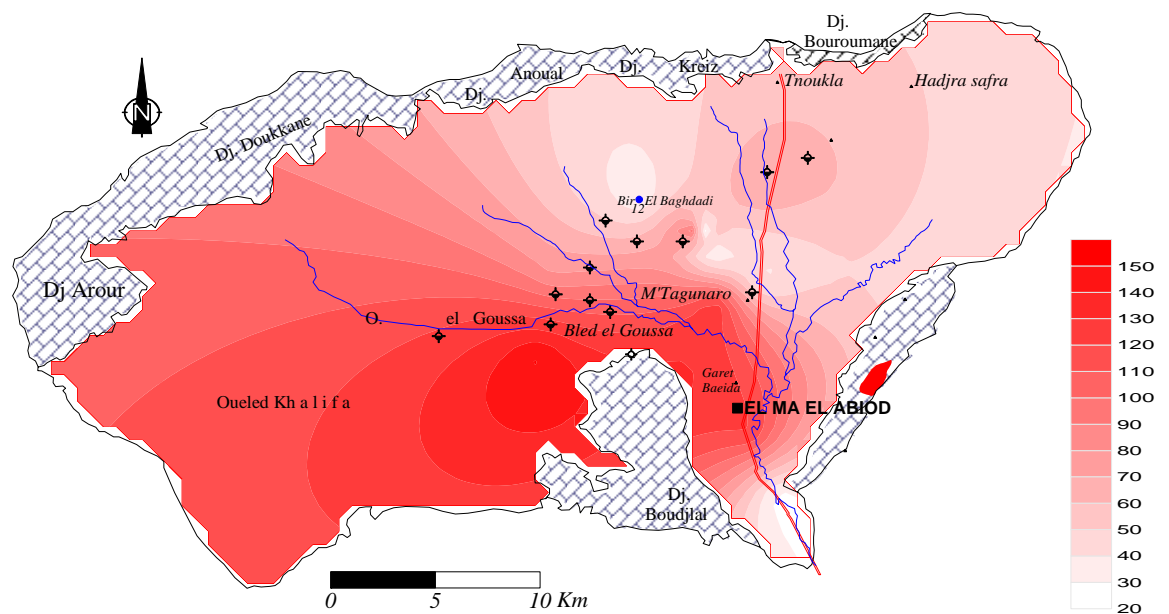


Fig. 45.3- Carte des Nitrates. Mars 2004

9. LES METAUX LOURDS (ZINC ET PLOMB)

Les métaux lourds sont présents dans tous les compartiments de l'environnement, mais en général en quantités très faibles. Nous nous intéressons ici uniquement au plomb et au zinc, parce que après l'installation des unités industrielles sur le périmètre de la Daïra d'EL Ma El Abiod, la région a connu un essor économique très important, notamment en matière d'approvisionnement en ciment portlands auprès de la cimenterie, ce qui a engendré un trafic routier important, caractérisé par la permanente présence sur la route nationale n°16 de véhicules poids-lourds.

A cause de cette situation, et parce que la principale ressource en eau souterraine se trouve dans des formations très perméables et naturellement mal protégées, nous avons pensé à une simple étude de type diagnostique, qui a pour intérêt de voir l'état et la situation des eaux souterraines vis-à-vis de la pollution par les métaux lourds (et en particulier la pollution engendrée par le trafic routier).

Pour mettre en évidence cette situation, nous avons utilisé deux campagnes hydrochimiques, la première concerne les résultats d'analyse du Zn et Pb effectués sur l'ensemble des puits de la plaine (campagnes de mars 2003. Lab. E.N. Ferphos). La deuxième campagne a quant à elle été effectuée à l'étranger (Institut de chimie de l'université de Lille) et a été réservée uniquement aux puits situés à proximité de la route nationale 16, de chaque côté. L'échantillonnage a été effectué selon un maillage de 1km², (cf. carte d'inventaire des puits d'observation des deux éléments)

9.1. Examen de la pollution par le Zinc et le plomb

Le trafic routier génère, donc une pollution métallique qui se dépose sur les sols et les voiries. Cette pollution est essentiellement particulaire. Les éléments Zn et Pb sont deux contaminants majeurs qui pénètrent dans les sols lors de l'infiltration des eaux pluviales (fig.46). Leur devenir est lié à leurs caractéristiques géochimiques et aux conditions physico-chimiques qui règnent dans le sol. Le plomb est très peu mobile du fait de sa très faible solubilité et de sa grande affinité pour la plupart des sols. Le zinc, plus soluble, se fixe généralement moins fortement sur la matrice et est donc plus mobile.

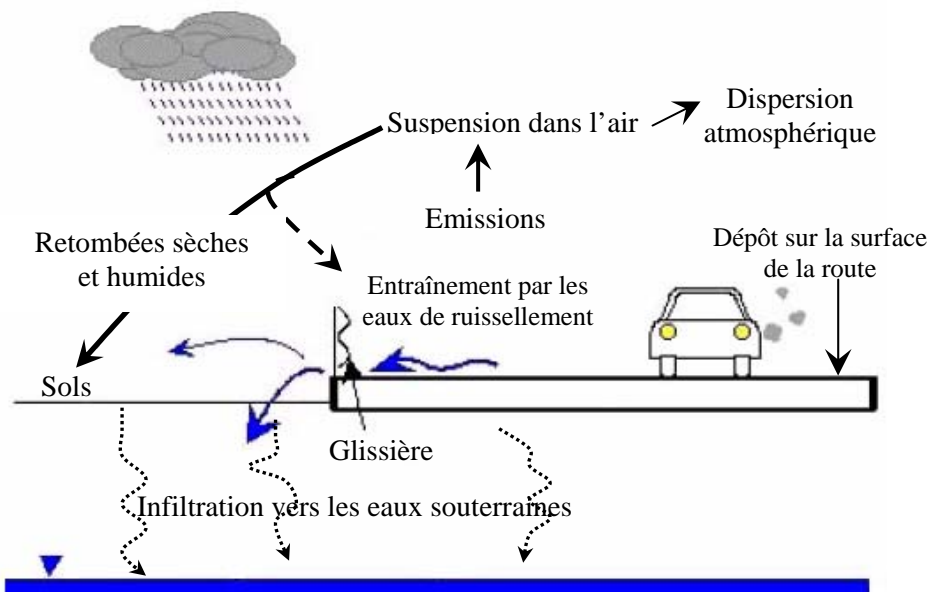


Fig.46 – Mode de transfert des émissions polluantes vers les sols et les eaux souterraines

Par conséquent, nous allons examiner l'état de pollution que la route nationale N°16, reliant El Oued à Annaba sur sa partie allant d'El Ma El Abiod à Tébessa, peut avoir sur les eaux souterraines, puisque elle est tracée sur des formations perméables qui couvrent l'aquifère contenu dans les sables du Miocène.

Dans un premier temps, nous exposerons tous les éléments hydrogéologiques par le biais d'un aperçu géologique ; à partir duquel nous verrons l'emplacement des différentes formations constituant le bassin versant de la région. Viendra ensuite un aperçu sur le climat qui règne dans la région, pour voir les composantes du bilan qui peuvent aussi engendrer un problème potentiellement grave dans un futur proche, vu l'accroissement du trafic intervenu après l'installation des différentes unités industrielles. Le chapitre, réservé à l'hydrogéologie des eaux souterraines, peut amener des réflexions importantes sur le devenir d'un tel foyer de pollution, ainsi que les perspectives qui peuvent être à l'amont des mesures de prévention contre ce type de pollution.

9.2. Eléments favorisant la pollution liée au trafic routier

9.2.1. Géologie et Profondeur du plan d'eau

La nature des formations de couverture ; argiles sableuses, alluvions et par endroit des sables qui affleurent en surface, facilitent le transfert des polluants depuis la surface vers le sous-sol. En effet, ce type de formations, particulièrement vulnérable favorise, la contamination des sols et par la suite celle des eaux souterraines.

Les campagnes piézométriques et d'inventaire indiquent que la surface du plan d'eau se trouve à quelques mètres (06- 18m) de la surface du sol, ce qui favorise l'accumulation et le transfert des polluants dans la zone non saturée et ensuite vers la nappe.

9.2.2. Les conditions climatiques

Il s'agit là encore d'un élément très important, notamment lors du transfert des polluants liés au trafic routier. L'intensité des pluies, et surtout celles de la période estivale (les pluies orageuses) favorise le lessivage de la chaussée et l'entraînement des polluants

9.2.3. L'infiltration

L'infiltration, est le processus d'entrée de l'eau dans le sol à travers sa surface et verticalement vers le bas. Ce processus dépend de l'alimentation en eau de la surface (précipitation et ruissellement), des conditions d'humidité du milieu qui reçoit l'eau et de ses caractéristiques hydrodynamiques.

A la surface du sol, les polluants (retombées atmosphérique du Pb et Zn ou ceux en suspension) auront une grande facilité de passage lorsque le sol est utilisé à des fins agricoles ou lorsqu'il présente des conditions de vie adéquate pour des êtres vivants tel que les vers de terre (Fig. 47.a)

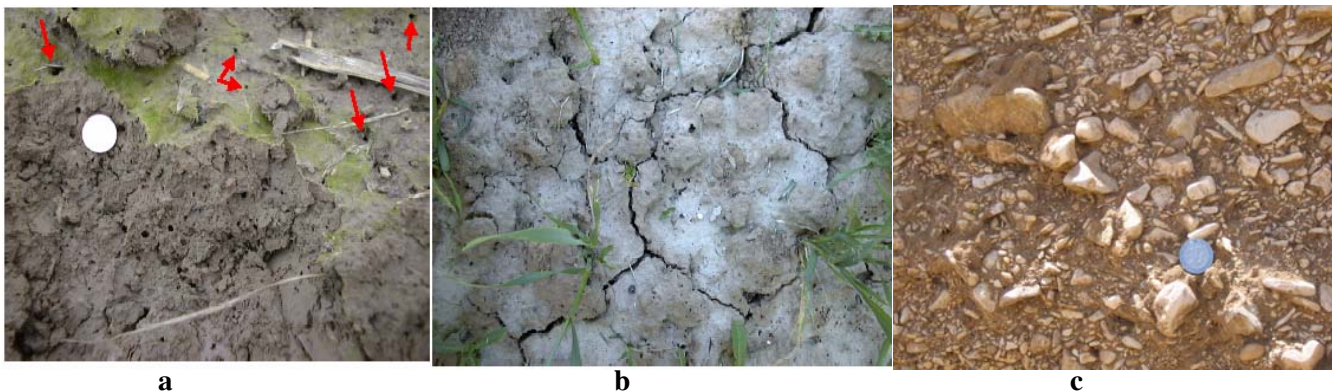


Fig. 47-Risque de migration des polluants par infiltration des eaux à travers un sol poreux
a- Sud de la plaine b- à M'Taguinaro c- à El Goussa

Les mesures de l'infiltration réalisée in situ, par nos soins dans le cadre de la présente étude, nous ont permis de cartographier les résultats obtenus, et de voir les secteurs qui sont favorables à l'infiltration des eaux de ruissellement sur la chaussée.

Nous pouvons constater que les zones d'alimentation coïncident avec ceux signalées dans le paragraphe sur les conditions aux limites : les zones Nord et Nord-est sont vulnérables aux pollutions, puisque elles présentent des infiltrations élevées.

9.3. Examen de la pollution par le trafic routier sur la RN 16

C'est le point le plus important de notre travail. La région d'étude est à vocation agricole, l'intensité de cette activité provoque, au fil des jours, et sans aucun doute, une pollution certaine, due à l'apport de produits fertilisants et organiques, tels que les nitrates comme nous l'avons déjà constaté dans plusieurs travaux en matière de pollution réalisés dans la région [Baali et al. 1994, Guefaïfia, 1996, Rouabhia 2001, Rouabhia et al. 2004,].

De récentes installations industrielles ont provoqué une augmentation importante du trafic routier et notamment des véhicules de type lourds pour le transport des différents produits (tubes roulés, briques et ciments).

Nous avons voulu établir un recensement du nombre de véhicules roulant sur le tronçon de la RN 16 reliant El Ma El Abiod et Tébessa, mais malheureusement, les services de transport de la wilaya ne disposent pas de chiffres pour les dernières années. Lors de l'une des sorties de terrain nous avons fait les constatations suivantes :

Type de véhicules	Léger	Lourds	T. Voyageurs	agricole
23.05.2005 de 10h à 10h.15	28	14	8	05
Extrapolation				
15 min	28	14	8	05
30min	56	28	16	10
(01) Une heure	112	56	32	20
La journée	2688	1344	768	480
Le mois	80640	40320	23040	14400
L'année	967680	483840	276480	172800

Tab.29 – Intensité du trafic routier sur la RN 16 (El Ma El Abiod – Tébessa)

Les chiffres indiquent un trafic important, qui peut traduire la réalité de ce qui se passe sur cette route nationale.

9.3.1. Inventaires des points d'observation

Pour visualiser et examiner l'éventuelle pollution par les deux éléments en question (Plomb et zinc) nous avons cartographié la répartition des deux éléments sur la totalité de la plaine (puits en bleu sur la carte d'inventaire fig. 48), et sur les rives de la route (puits en rouge).

Les échantillons d'eau prélevée ont été dosés au laboratoire de chimie de l'Université de Lille (France). Sur le tableau figurent quelques résultats concernant ces deux éléments :

Puits	P2	P4	P5	P7	P8	P9	P11	P12	P15
Zn	0.002	0.426	0.258	0.410	0.150	0.129	0.146	0.545	0.053
Pb	0.025	0.012	0.010	0.009	0.019	0.020	0.032	0.017	0.042

Tab.30– Concentration en plomb et Zinc au point de prélèvement sur les deux cotés de la RN 16

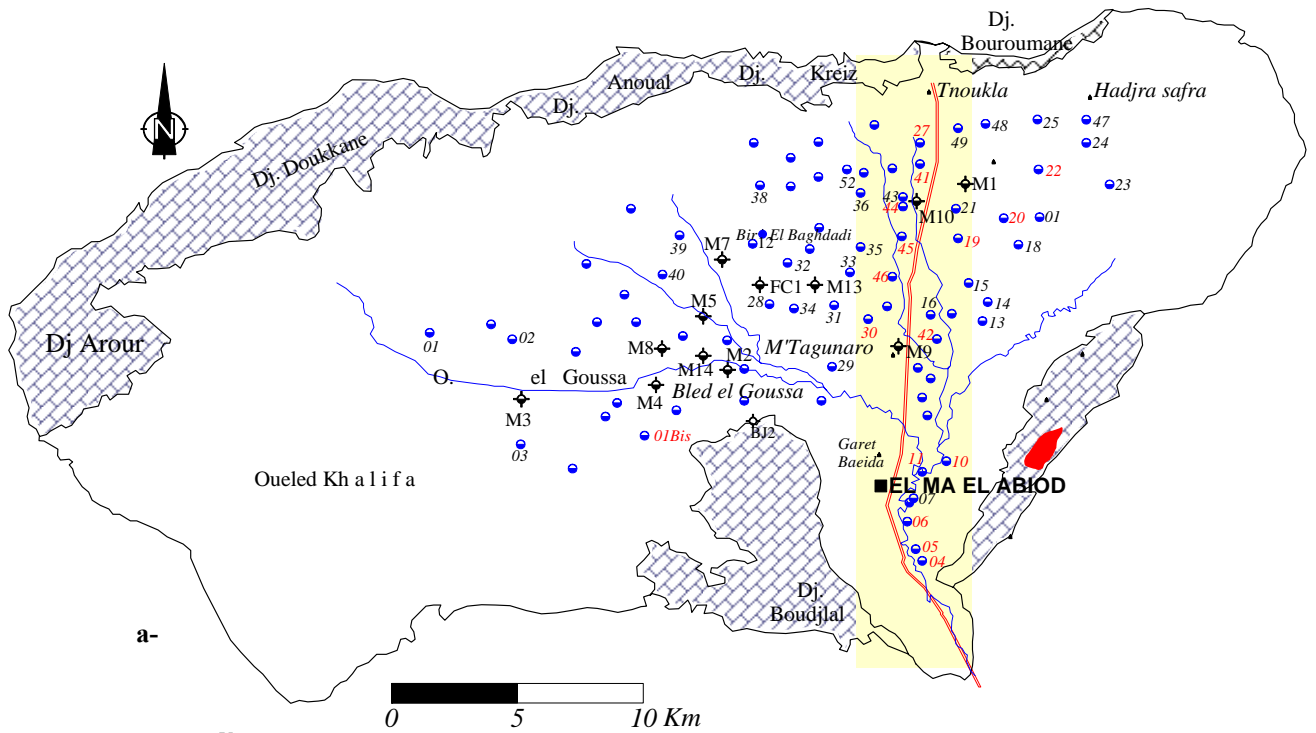
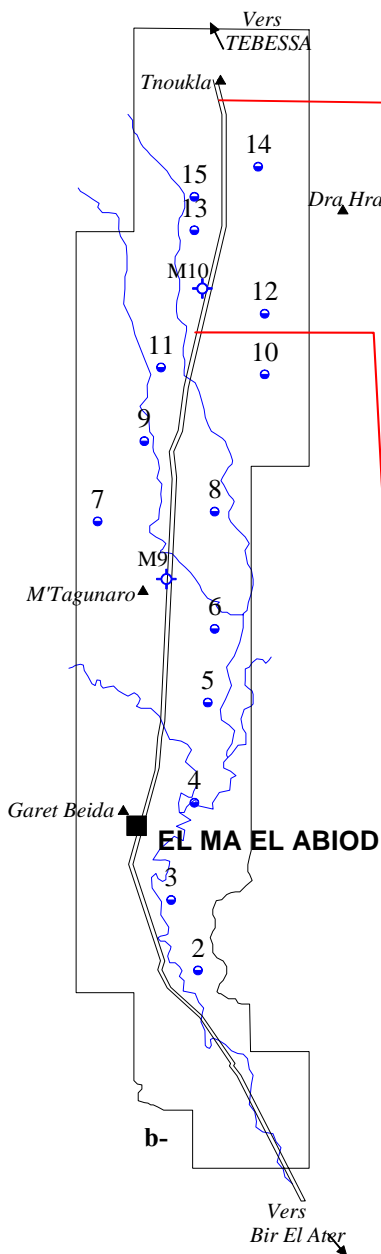


Fig. 48 – Carte d’inventaire des points d’échantillonnage

- a- sur l’ensemble du terrain
- b- sur les deux rives de la RN 16



Ancienne carrière à proximité de la RN 16 à T'noukla



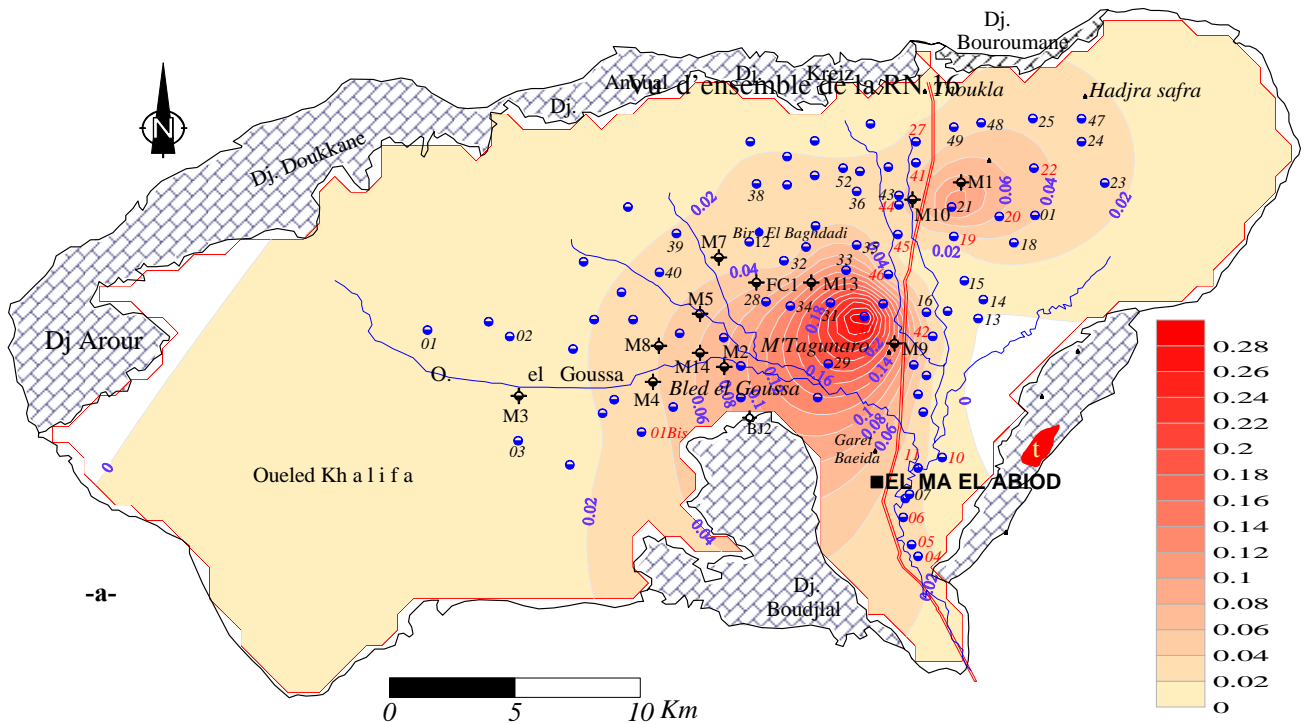


Fig. 49 - Carte de répartition du Plomb

-a- sur l'ensemble de la plaine

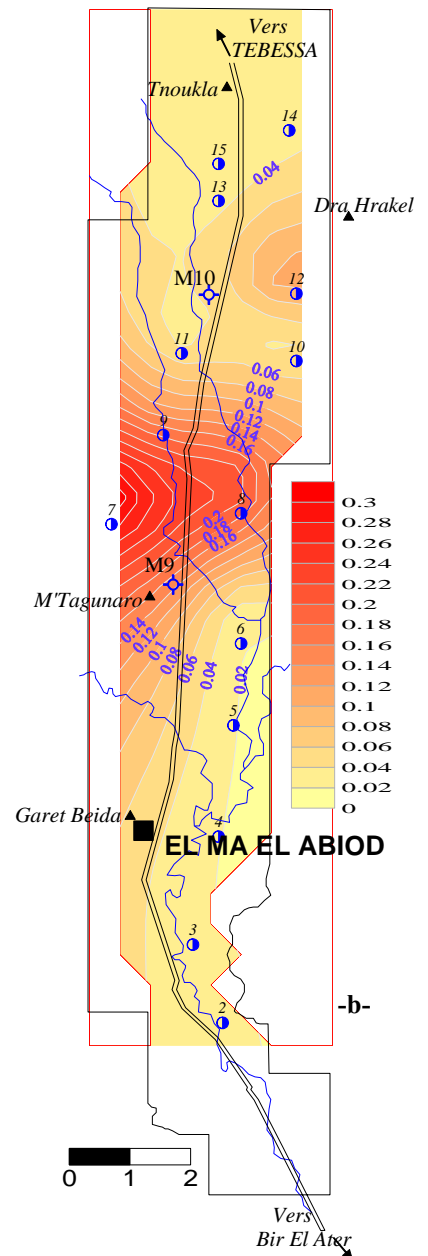
-b- sur les deux rives de la route « RN16 »

9.3.2. Cartographie de la répartition du Plomb

Sur l'ensemble de la plaine, Fig.49. Les concentrations en plomb, sont élevées au centre et au Nord-Est, cette situation est confirmée par une cartographie de proximité de la source de pollution en cet élément (route nationale N°16) sur laquelle il est clair que dans le secteur de M'Tagunaro les échantillons d'eau présentent des teneurs élevées

Par analogie à la répartition du zinc les concentrations en plomb suivent le sens de l'écoulement des eaux souterraines, qui se fait du nord vers le sud. Cette situation est due à la fixation de l'élément par les argiles,

Il semble aussi que ces concentrations ne sont pas dues uniquement à l'intensité du trafic routier en cet endroit mais aussi à l'activité industrielle (la cimenterie d'El Ma El Abiod), ainsi que la géologie.



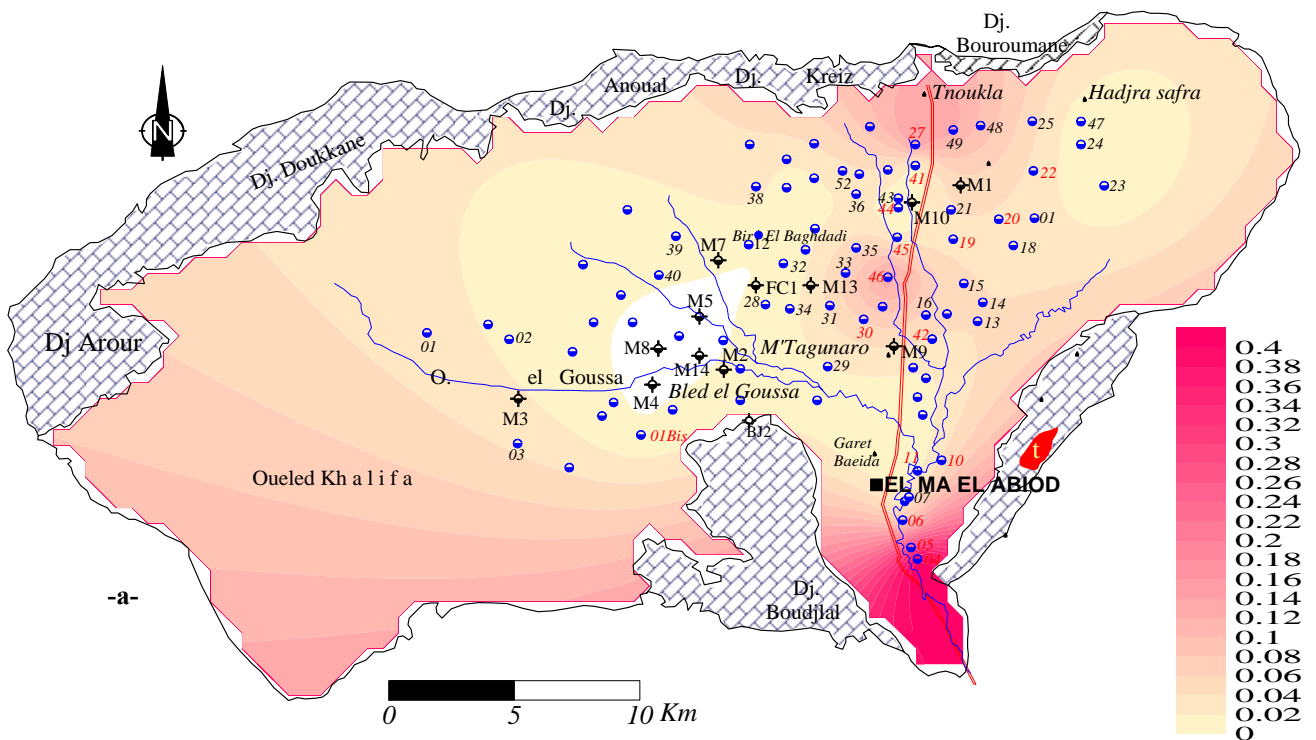


Fig. 50 - Carte de répartition du zinc

- a- sur l'ensemble de la plaine
- b- sur les deux rives de la route « RN16 »

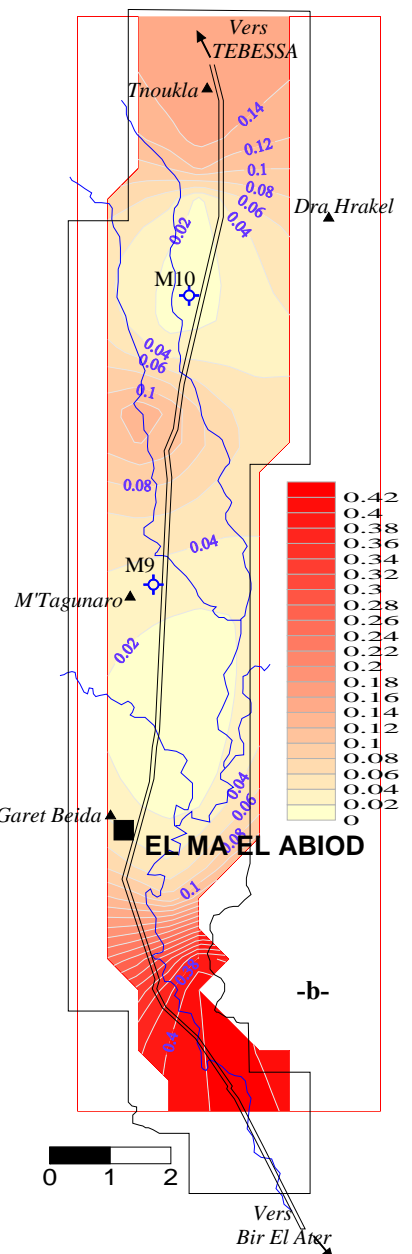
9.3.4. Cartographie de la répartition du Zinc

L'examen de la carte de répartition du zinc sur le territoire de la plaine, montre que ce dernier présente un comportement analogue a celui de la Piézométrie c'est-à-dire que les concentrations suivent le sens de l'écoulement, il est claire que ces concentrations commencent forte au nord, et s'affaiblissant au centre pour qu'elle se retrouve en fin en forte dose au sud à l'exutoire.

Cette situation nous a amener a pensé cartographier cet élément de part et d'autre de la route nationale 16. sur 1,5 kilomètre Est et ouest

Les deux cartes globales et parcellaires, présentent le même scénario, les concentrations sont élevées au Nord, au centre et au sud coïncidant avec les zones de recharge de la nappe, parce que en ces endroits la nappe des sables miocène se trouve a quelques mètres de la surface du sol, ce qui facilite donc l'entraînement de ces deux élément vers la zone saturée et puis directement vers la nappe.

L'accumulation des métaux lourds est très inquiétante parce qu'ils ne sont pas biodégradables et les micro-organismes du sous sols n'ont aucun effets sur leur devenir.



9.3.5. Corrélation entre les deux éléments

Pour avoir une idée sur l'origine des deux éléments nous avons établi une corrélation (fig. 51) qui amène les remarques suivantes :

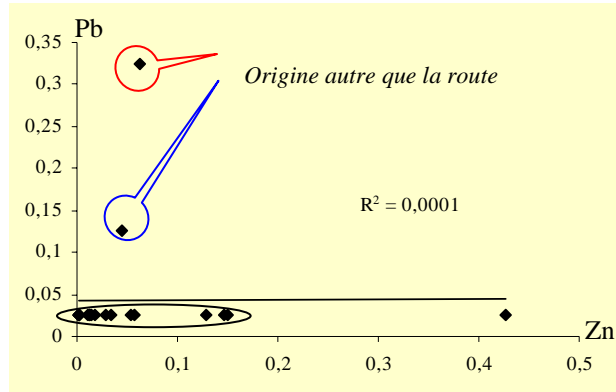


Fig. 51 - corrélation entre le Zn et le Pb

- les points qui sont alignés sur une droite parallèle à l'axe du zinc indiquent que les deux éléments proviennent de la chaussée.
- Deux éléments présentent une allure différent et qui s'oppose aux premiers (parallèle à l'axe du plomb), indiquant ainsi une origine autre que la route, qui ne peut être que la lithologie.

9.3.6. Evolution spatiale des deux éléments

Les deux éléments zinc et Plomb présentent la même évolution (fig51.1), également pour ce qui est de la concentration, sauf pour le centre de la plaine, où le Plomb présente des teneurs plus élevées que le zinc, ce qui traduit une deuxième source d'alimentation en cet élément. Cette source peut être la géologie, parce qu'au centre du terrain affleurent des formations calcaires et argileuses.

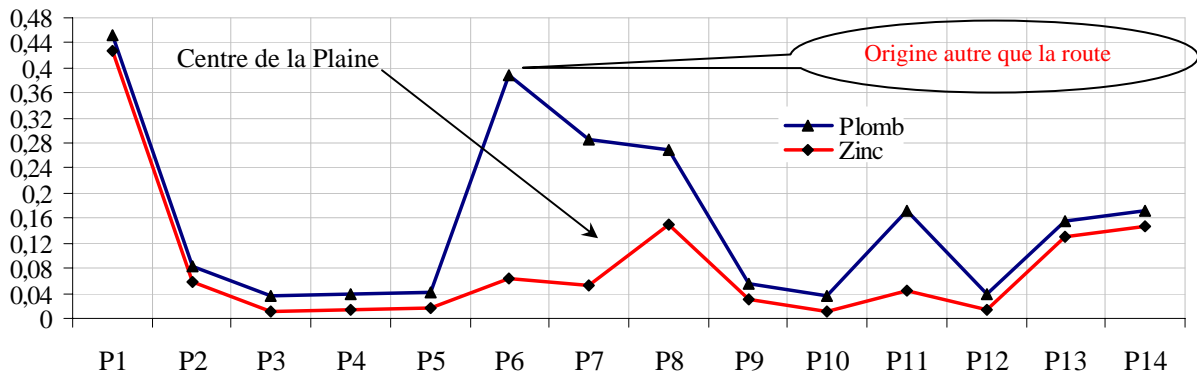


Fig. 51.1 – Evolution dans l'espace du Plomb et du Zinc

9.5. ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

Dans cette étude, plusieurs analyses en composantes principales ont été effectuées sur les campagnes d'échantillonnage étalées sur la période d'observation (2000 – 2005). Celle-ci se décompose présentement en trois parties : analyse des eaux de l'année 2000, analyse des eaux de l'année 2003 et une analyse globale des éléments chimiques de toutes les campagnes. Le logiciel utilisé est WinIdams v.1.2 de l'UNESCO (2004) : [http : //www.unesco.org/idams](http://www.unesco.org/idams)

Le but de cette analyse statistique (ACP) est de faire ressortir les différents points d'eau qui possèdent des concentrations élevées en éléments chimiques par rapport à l'ensemble des points d'observation. Il sera ainsi possible d'avoir une idée sur le comportement hydrochimique et les sites de pollution.

9.5.1. Choix de la méthode

La méthode regroupe le traitement de description et de comparaison simultanée des différentes variables et l'analyse des données multidimensionnelles (statistique descriptive). Ce que nous cherchons à mettre en évidence, ce sont les liens éventuels qui pourraient regrouper deux ou plusieurs variables au cours de leur évolution.

9.5.2. Principe de la méthode

Les données constituent un tableau à deux entrées :

- Celle des variables chimiques.
- Celle des échantillons qui constituent les unités statistiques (U.S)

Les valeurs des variables pour toutes les unités statistiques peuvent être représentées par un nuage de points, aussi bien dans l'espace des variables que dans l'espace des U.S.

Le principe de l'analyse consiste à chercher des plans de projections sur lesquels la projection s'effectuerait avec un minimum d'erreur.

Ces plans sont caractérisés par deux axes factoriels dont le calcul est effectué à partir des variances et des covariances des variables.

Le premier axe F1 est tel qu'il détermine le maximum de variance, c'est-à-dire, le maximum d'inertie des nuages. Le second axe F2 est perpendiculaire à F1, de telle façon qu'il exprime le maximum de variance non déterminé par F1. le troisième axe F3 est perpendiculaire à F1 et F2 et exprime le maximum de variance non exprimée par les deux premiers.

En règle générale, on projette les U.S jusqu'à ce que 90% environ de la variance totale soit exprimée.

A chaque axe factoriel est associé un facteur et après la mise en évidence des principaux facteurs responsables de la structure observée, l'ACP permet de décrire le nuage graphiquement, soit dans l'espace des variables, soit dans celui des US.

9.5.3. L'espace des variables

Les variables initiales sont projetées dans les différents plans factoriels pour que toutes les variables aient le même poids, on a utilisé une ACP « métrique normée » les variables se projettent dans un cercle de rayon (1) appelé cercle de corrélation. Puisque la distance entre le centre du cercle et une variable est proportionnelle à la corrélation multipliée avec le facteur engendrant l'espace, plus une variable est située près du cercle, mieux elle est représentée

dans le plan considéré, et c'est à partir de ce graphique que sont définis les différents facteurs responsables de la structure observée.

9.5.4. L'espace des unités statistiques

Dans les différents plans factoriels, les US possèdent deux nouvelles coordonnées appelées composantes principales. Cette représentation permet de synthétiser, la position des US entre et par rapport aux facteurs, donc aux variables.

En plus des descriptions des graphiques, le dépouillement des résultats est nécessaire, à savoir :

- La matrice des coefficients de corrélations, elle donne la liaison qui existe entre toutes les variables deux à deux
- Le tableau, des valeurs propres de facteurs (variance exprimée par chaque variable) : permet d'apprécier l'importance du caractère représenté par un axe factoriel par rapport aux autres.

Cette variation peut s'exprimer aussi en %

- Le tableau des vecteurs propre sur chaque axe : ce sont ces coordonnées qu'on utilise pour reporter les points du nuage dans l'espace des variables.
- Le tableau des coefficients de corrélation carrés des variables avec chaque axe factoriel : coefficients permettent d'apprécier l'importance du rôle joué par chaque variable dans la détermination de l'axe.

Graphiquement, cette importance est exprimée par le fait qu'une variable est projetée loin de l'origine suivant l'axe factoriel en question.

9.6. APPLICATION

9.6.1. CAMPAGNES DE L'ANNEE 2000

La matrice des données comporte sept (07) variables et 110 individus (U.S). Pour le traitement nous avons choisi cinq axes qui expriment 91% des renseignements.

axes	F1	F2	F3	F4	F5
Valeurs propres	3.5	1.2	0.7	0.5	0.3
contribution	53.7%	18.3%	12.2%	8.3%	5.1%

a- Matrice de corrélation

	Cl	SO ₄	NO ₃	HCO ₃	Ca	Mg	Na+K
Cl	1						
SO ₄	0.61	1					
HCO ₃	0.25	0.35	1				
NO ₃	0.004	-0.04	-0.3	1			
Ca	0.57	0.61	0.35	-0.15	1		
Mg	0.13	0.19	0.14	0.05	-0.07	1	
Na+K	0.48	0.42	0.16	-0.03	0.45	0.03	1

La matrice présente les différentes corrélations entre les variables prises deux à deux. La signification du coefficient (r) est fonction du nombre d'individus traité.

b- Analyse des cercles ACP :

Cercle ACP1 : Fig.52

Nous allons limiter notre interprétation au cercle formé par les axes F1 et F2, puisqu'il fournit le maximum d'information (65,8 %)

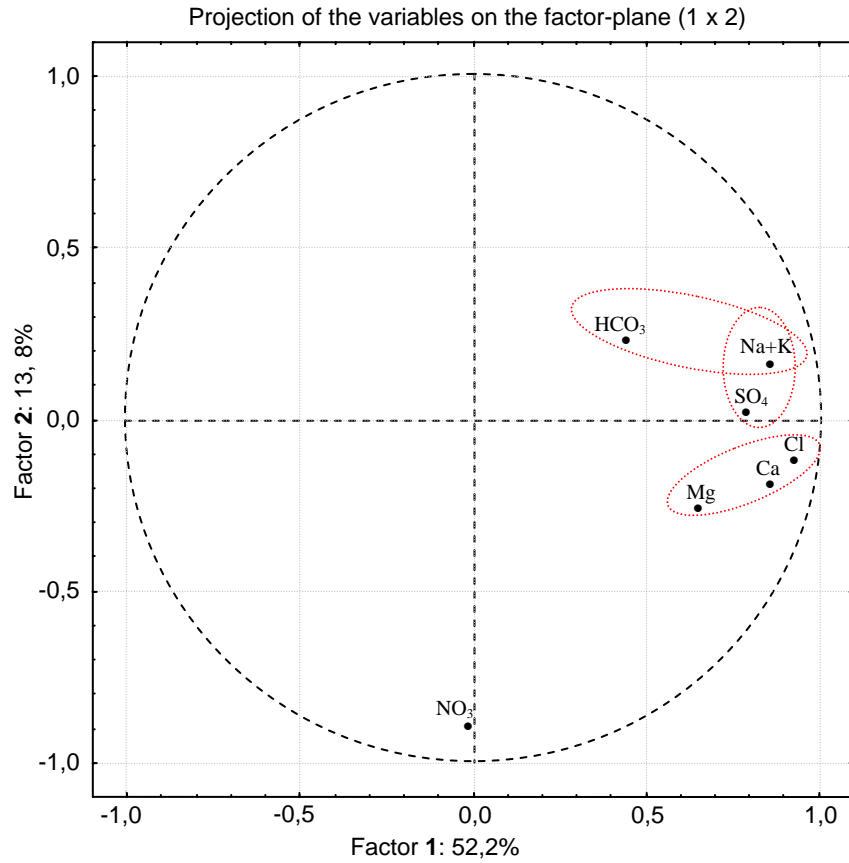


Fig N° .52- Représentation graphique en ACP1 des données chimiques. Année 2000.

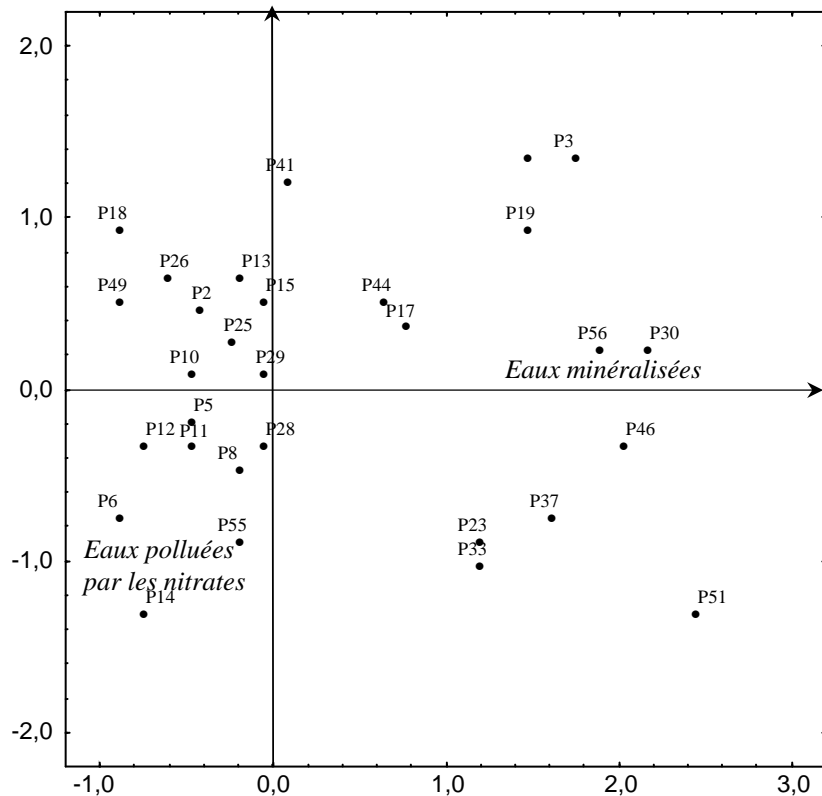


Fig N° . 52.1- Représentation graphique des Individus. Année 2000.

c- L'espace des variables

Le facteur F1 horizontal exprime 52,2% des informations et oppose les eaux fortement minéralisées riche en HCO₃, Cl, SO₄, Ca, Mg et Na aux eaux faiblement minéralisées et polluées par les nitrates. Cette pollution est corrélée négativement par apport aux ions, ce qui met en évidence une origine exogène des nitrates. L'axe F2 vertical exprime 13,8% des renseignements, il oppose les eaux bicarbonatées sodiques ou sulfatées sodiques aux eaux chlorurées calciques ou chlorurées magnésiennes polluée par les nitrates. Les cercles ACP2, ACP3, ACP4 et ACP5 confirment la répartition décrite.

d- Etude des individus

Le graphe met en évidence trois familles d'eaux qui s'opposent deux à deux. L'axe F1 montre l'opposition entre les eaux bicarbonatées et chlorurées d'une part et les eaux présentant des teneurs élevées en nitrates d'autre part. La composition chimique des eaux est directement influencée par l'alimentation de l'aquifère ; c'est-à-dire par les calcaires des bordures où les eaux sont bicarbonatées, par contre la présence des chlorures est conditionnée par la présence des argiles, des sables ...etc. Ceci montre l'importance du lessivage des formations traversées par les eaux. La pollution par les nitrates est d'origine anthropique, due à l'utilisation anarchique des engrais.

9.6.2. CAMPAGNE DE L'ANNEE 2003

Cette ACP a été effectuée sur les eaux de cinquante points d'eau qui sont utilisés pour expliquer la variation de huit (08) variables.

a- Matrice de corrélation

	Cl	SO ₄	NO ₃	HCO ₃	Ca	Mg	Na+K	PH
Cl	1							
SO ₄	0.82	1						
NO ₃	-0.03	0.02	1					
HCO ₃	-0.06	0.02	-0.20	1				
Ca	0.61	0.51	-0.15	0.20	1			
Mg	0.63	0.60	-0.03	0.10	0.35	1		
Na+K	0.91	0.49	-0.03	0.03	0.41	0.39	1	
PH	-0.26	-0.04	-0.24	-0.89	-0.18	-0.32	-0.03	1

b- Cercle ACP1 : Fig.53

Le cercle ACP1 est déterminé par les axes F1 et F2 qui fournissent 58% de l'information totale.

c- L'espace des variables

L'axe F1 horizontal exprime 58,8% de la variance, il montre un regroupement de toutes les variables traduisant la minéralisation de l'eau. Ainsi qu'une opposition entre les eaux riches en Cl, SO₄, Ca, Mg, Na et NO₃⁻ et les eaux faiblement minéralisées caractérisées par un P^H basique. L'axe F2 exprime 16,7% et indique une opposition entre les eaux riches en chlorures et sodium et les eaux polluées par les nitrates ainsi que celles dont la salinité est élevée.

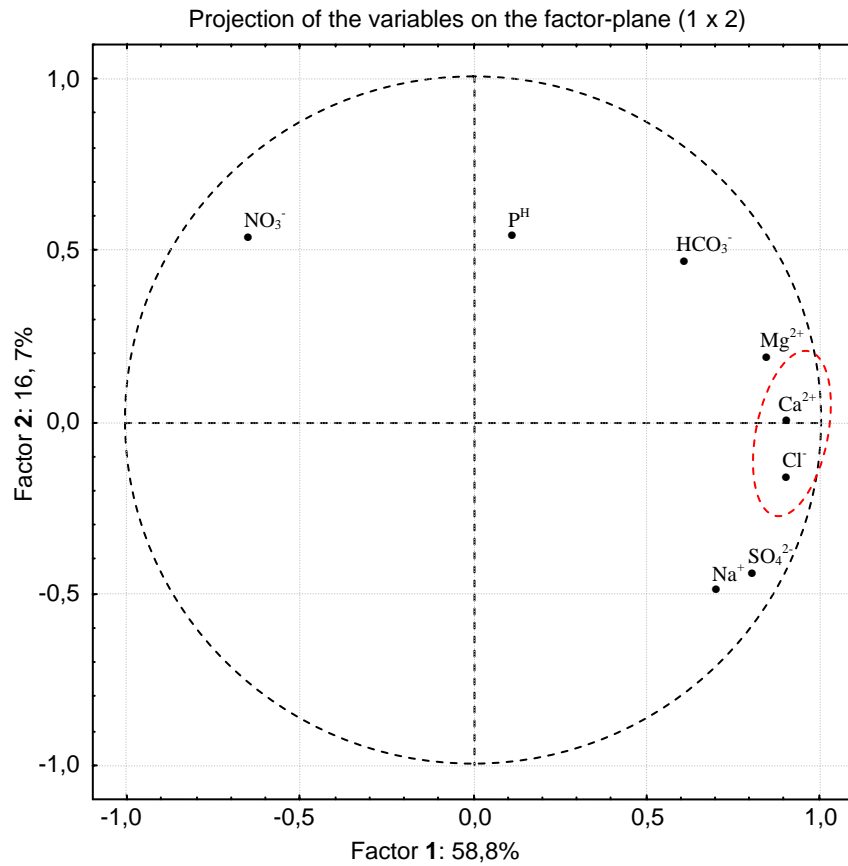


Fig. 53-. Représentation graphique en ACP1 des données chimiques. Année 2003.

d- Etude des individus

Le graphe qui représente la projection des individus, montre une évolution générale de la salinité qui se positionne entre les deux axes. Trois ensembles d'individus sont observés :

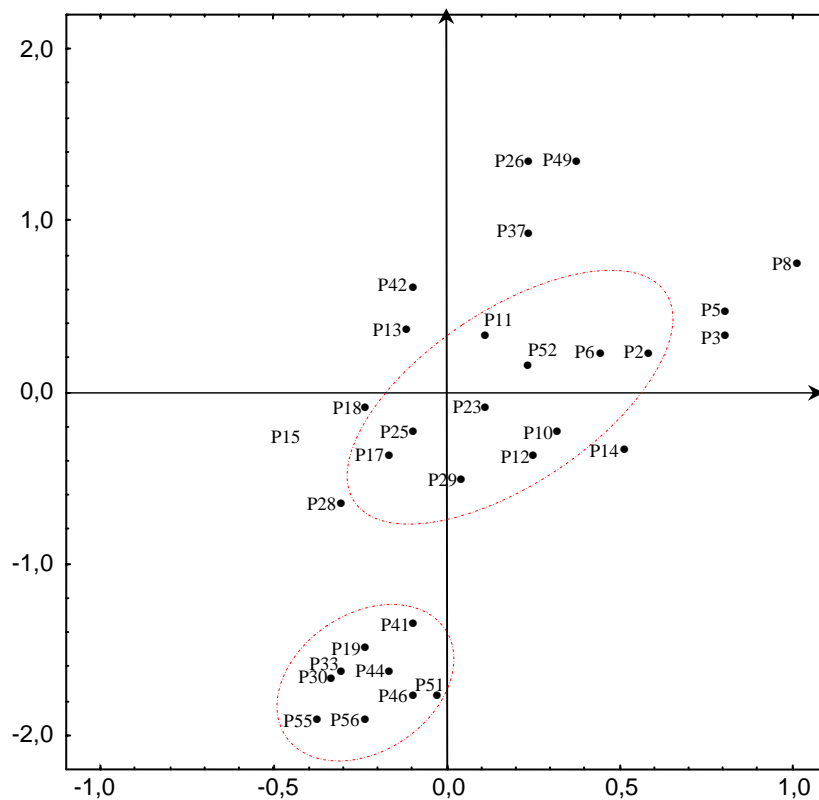


Fig.53.1- Représentation graphique des Individus. Année 2003.

- l'ensemble des eaux riches en chlorures et sodium, représentant les points situés en aval du terrain
- l'ensemble des eaux qui présentent l'influence de la géologie sur le chimisme et qui caractérisent les points d'eau issus du lessivage des formations évaporitiques.
- l'ensemble des eaux polluées par les nitrates, qui caractérise les points d'eau qui se trouvent généralement à l'intérieur des parcelles irriguées.

Cette ACP a donc permis de mettre en évidence la présence de trois différents types de points d'eau, à savoir les eaux de l'aquifère qui sont faiblement minéralisées, les eaux à salinité d'origine naturelle (due aux évaporites) et enfin les eaux polluées par les nitrates.

9.6.3. L'ENSEMBLE DES CAMPAGNES. ACP GLOBALE

Cette ACP (fig.54) a été réalisée sur 90 observations et neuf (09) variables (les échantillons qui possèdent une analyse complète)

Matrice de corrélation

	Cl	SO ₄	NO ₃	HCO ₃	Ca	Mg	Na+K	SiO ₂	PH
Cl	1								
SO ₄	0.08	1							
NO ₃	-0.03	-0.19	1						
HCO ₃	-0.55	-0.07	0.17	1					
Ca	-0.18	-0.24	-0.22	0.19	1				
Mg	0.50	0.28	0.42	-0.15	-0.29	1			
Na+K	0.04	-0.04	0.39	0.03	0.04	0.42	1		
SiO ₂	0.37	0.09	0.04	-0.29	-0.48	0.33	0.03	1	
PH	0.37	0.16	0.15	-0.42	-0.40	0.43	0.04	0.12	1

a- L'espace des variables

Le facteur F1 représente 53,2% de la variance, et oppose les chlorures aux bicarbonates et le PH. Le facteur F2 représente 15,7% de la variance, il est corrélé négativement au P^H.

L'opposition selon l'axe F1, entre les chlorures et les sulfates d'une part et le PH d'autre part, peut provenir des précipitations atmosphériques ou de l'oxydation des minéraux sulfurés, les teneurs en sulfates sont élevées, ce qui exclut la première origine, qui suppose que les sulfates et les chlorures aient eu une évolution similaires. Au contraire dans notre cas, ces deux ions sont opposés.

Sur la base de nombreuses données de terrain et en s'appuyant sur les constatations de Gieseking (1975), Bakalowicz (1980) a affirmé que lorsqu'il pleut en été ou en fin de printemps, l'eau d'infiltration est appauvrie en sulfates et enrichie en CO₂ du fait de l'action biologique du sol (c'est-à-dire lorsque l'activité biologique est très importante, il y a consommation de l'oxygène notamment celui de l'ion sulfate et donc immobilisation du soufre dans la matière vivante). Donc l'activité microbiologique du sol nous permet d'expliquer l'opposition entre les chlorures et les sulfates et rend compte du passage de l'eau dans le sol.

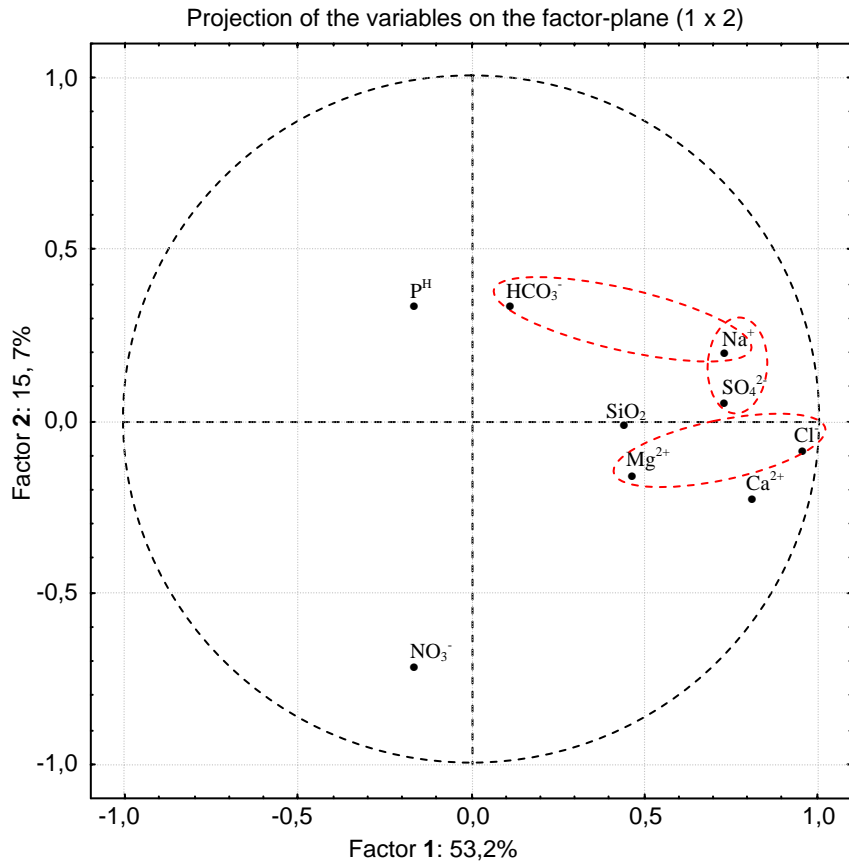


Fig. 54- Représentation graphique en ACP1 des données chimiques.
ACP Globale.

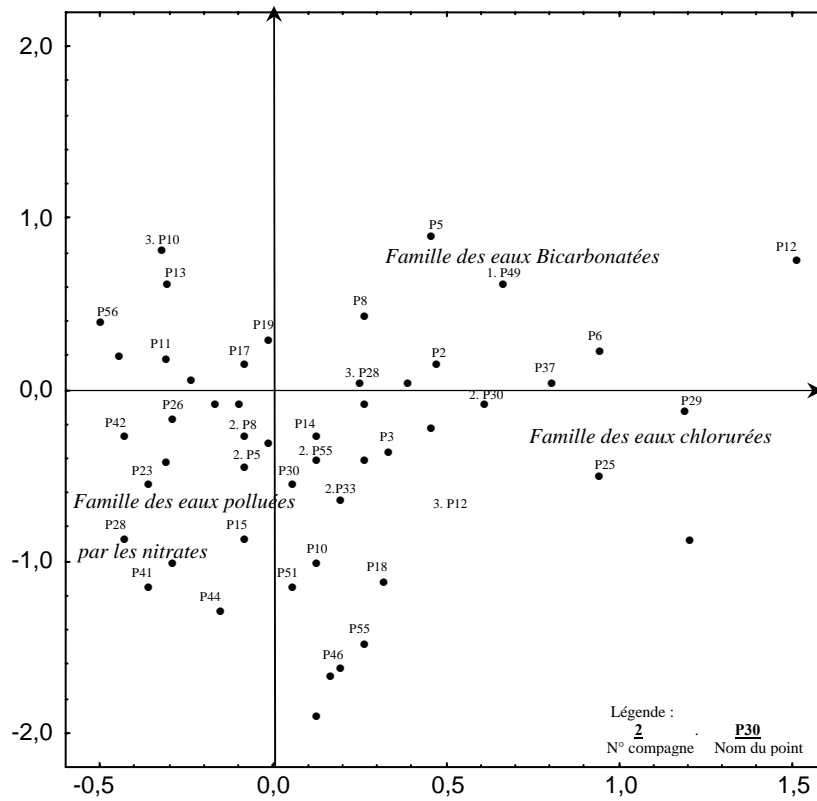


Fig. 54.1- Représentation graphique des Individus.
ACP Globale.

b- Etude des individus

La projection des individus, montre l'existence de trois ensembles qui présentent des positions différentes sur le plan 1 :2. La partie amont est caractérisée par une pollution, par les nitrates, due à l'utilisation anarchique des engrais, tandis que la partie intermédiaire est représentée par une forte minéralisation qui traduit aussi la salinité de quelques puits. Enfin la partie aval qui montre une forte minéralisation.

9.7. Conclusion

L'analyse en composante principale amène les constatations suivantes :

Les bicarbonates présentent des teneurs importantes en périodes pluvieuses montrant ainsi l'effet des apports qui se font par les bordures calcaires du nord.

Les nitrates qui polluent les eaux proviennent de la mauvaise utilisation des engrais (région agricole). Les chlorures, sulfates, sodium et calcium présentent des concentrations importantes, ce qui traduit la salinité des puits situés au SUD-EST de la plaine. Par ailleurs, on note une pollution des eaux par les nitrates, qui sont dues à l'utilisation intensive et anarchique des engrais.

10. APTITUDE DES EAUX DE LA PLAINE D'EL MA EL ABIOD A L'IRRIGATION

10.1. Introduction :

Après la série de forages réalisés par les services de l'état, la région a pris une nouvelle tendance dans l'activité agricole, toutes sortes de cultures ont été pratiquées. L'intensité des pratiques agricoles et la mise en place de nombreux systèmes d'irrigation ont provoqué un impact sur la qualité des eaux souterraines, notamment ceux de retour vers la nappe après irrigation.

Il est connu que les sels minéraux contenus dans l'eau ont des effets sur le sol et les plantes.

Les sels peuvent perturber le développement physique des plantes. Du fait de l'absorption de l'eau, on peut observer des effets sur les processus osmotiques, ou du point de vue chimique par des réactions métaboliques, telles que celles causées par les constituants toxiques. En plus, (Person j. 1978) les sels causent des changements dans la structure du sol (sur sa perméabilité et son aération), affectant directement le développement de la plante.

La sécheresse de la dernière décennie a engendré un fort déficit (démonstré par les calculs du bilan hydrique) et une forte évapotranspiration, influençant le taux de salinité des eaux. Les formations géologiques (sables, grés, gypse ...) traversées par les eaux modifient la composition chimique de celles-ci. Dans cette partie de la thèse nous allons mettre en évidence l'utilisation à des fins agricoles des eaux de la région. Sont prises en compte dans les calculs quatre périodes, à savoir octobre 2000, juin 2002, octobre 2003, et mars 2004. Les méthodes de Richards et Wilcox, les plus fréquemment utilisées, seront développées.

10.2. Risque de sodicité et de salinité

La salinité peut entraîner des effets nocifs conséquents en raison de la fixation du sodium des sels de chlorures de sodium par les colloïdes du sol. Le sodium exerce alors une action néfaste sur la végétation, de façon indirecte, en dégradant les propriétés physiques du sol. De part cette action, les sols deviennent compacts et asphyxiants pour les plantes (tood D.K 1980). Lorsque la concentration des ions Na^+ à l'état soluble dans le sol est importante, ces ions remplacent fréquemment les cations Ca^{2+} dans le complexe absorbant. Une eau chargée en sels peut provoquée cet effet. Le risque est déterminé à partir de la valeur du sodium absorbable, « Sodium Absorption Ratio : SAR ». Pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé.

L'aptitude de l'eau à l'irrigation peut être jugée non seulement à partir de la concentration totale en sels, mais aussi par le type de sels et les ions qui la constituent. Il est donc impératif d'étudier les paramètres qui définissent les caractéristiques des eaux destinées à l'irrigation.

10.3. Calcul des paramètres des eaux à usage agricole :

Les principaux facteurs qui peuvent dégrader la qualité des eaux pour l'irrigation se résument donc à la concentration en sels dissous exprimée par le résidu sec ou la conductivité électrique, la salinité potentielle, la concentration relative en sodium et la quantité des éléments toxiques (Bore et Chlore) présents dans l'eau. Quand les sels sont

concentrés dans les solutions de sol, chacun des facteurs dégradant la qualité, à un effet sur la croissance de la plante et par conséquent sur sa production d'une part, et d'autre part sur les propriétés physiques et chimiques.

L'effet primordial de la salinité totale est de réduire la croissance des cultures et leur production, elle est généralement exprimée par la minéralisation globale ou par la conductivité électrique (CE). Cette dernière est liée au résidu sec (RS) et à la pression osmotique (π) par les formules suivantes :

$$\begin{aligned} \text{RS (mg/l)} &= 0.7 \text{ CE } (\mu \text{ s/cm}) & (1) \\ \pi(\text{atm.}) &= 0.00036 \cdot \text{CE} & (2) \end{aligned}$$

La salinité du sol est constituée par tous les sels de chlorures de sodium et des sulfates de magnésium, par conséquent la salinité potentielle (Sp) pourrait être estimée par (Doneen, 1961) :

$$\text{SP} = \text{Cl} + \frac{1}{2} \text{SO}_4^{2-} \quad : \text{Tous les termes sont exprimés en mé/l}$$

Pour le sodium, il a été reconnu que sa concentration dans les eaux d'irrigation a une influence sur la perméabilité et l'infiltration des sols. La présence de Na^+ a des effets néfastes sur la structure des sols par défloculation de l'argile. Cet effet est interprété par différents auteurs en calculant plusieurs paramètres tels que le SAR déjà signalé :

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^{++}}{\sqrt{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2}} \quad (3)$$

Le pourcentage en sodium est donné par

$$\% \text{Na} = \frac{(\text{Na}^+ + \text{K})}{(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K})} \times 100 \quad (4)$$

Le pourcentage d'échange de sodium ;

$$\text{ESP} = 100 \frac{[-a + b(\text{SAR})]}{1 + [-a + b(\text{SAR})]} \quad \text{Où } a = 0,0126 \text{ et } b = 0,01475 \quad (5)$$

Dans les formules ci-dessus, tous les éléments sont exprimés en mé/l. De plus, des études récentes ont indiqué que la perméabilité du sol dépend de plusieurs autres facteurs tels que la concentration totale de l'eau, la quantité de sodium, la concentration en bicarbonates et la nature du sol lui-même. Les trois premiers termes ont été combinés dans une seule formule donnant ce qu'on appelle l'indice de perméabilité (IP) défini par (Doneen, 1961) :

$$\text{IP}(\%) = \frac{\text{Na}^+ + \sqrt{\text{HCO}_3}}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+} \times 100 \quad \text{Où tous les termes sont en mé l} \quad (6)$$

Parmi les éléments reconnus toxiques, on note les concentrations en bore et en chlore. Le bore est généralement présent dans certaines eaux d'irrigation en quantité indésirables mais pas tellement toxiques. Quant au chlore, sa présence excessive dans le sol exerce des effets défavorables sur la végétation et la qualité de certaines cultures. Ces différents paramètres peuvent agir séparément ou de façon combinée dans la classification des eaux à usage agricole.

10.4. Interprétation des résultats

Les facteurs les plus importants, intervenant dans la qualité de l'eau pour l'irrigation sont calculés pour mieux définir l'aptitude des eaux de la plaine d'El Ma El Abiod à l'irrigation selon les classifications utilisées de nos jours.

Puits	CE	P. osmo.	% Na ⁺	SAR	IP%	ESP	SP	RS
P1	2100	0,756	37,1247	1,1787	54,6	0,4763	3,50073	1470
P13	901	0,324	23,1579	1,0468	32,93	0,2833	8,4174	630,7
P4	1355	0,488	35,7006	2,116	42,09	1,8271	11,3668	948,5
P6	3360	1,21	51,3619	5,1962	55,74	6,0189	18,5335	2352
P7	4510	1,624	54,3201	7,2172	58,78	8,58	27,6957	3157
P8	1746	0,629	32,5916	2,048	36,84	1,7303	18,0276	1222
P10	1250	0,45	30,0851	1,2089	35,71	0,5204	9,42415	875
P11	668	0,24	52,9801	0,5307	48,44	-0,479	2,70687	467,6
P12	646	0,233	5,83821	0,0599	26,62	-1,186	5,51643	452,2
P15	1145	0,412	31,185	1,2773	31,85	0,6201	9,67342	801,5
P17	706	0,254	24,7756	1,0703	39,46	0,3177	8,84375	494,2
P18	707	0,255	9,4608	0,0126	27,1	-1,257	6,3527	494,9
P19	625	0,225	32,8358	0,5443	30,85	-0,459	4,55502	437,5
P21	942	0,339	27,4062	1,0386	37,42	0,2712	6,18677	659,4
P22	825	0,297	34,9057	1,0768	44,21	0,3272	6,68603	577,5
P23	988	0,356	29,1971	0,9082	37,52	0,0795	7,85563	691,6
P25	922	0,332	25,5621	0,4368	35,3	-0,62	7,21508	645,4
P26	805	0,29	53,995	0,9368	39,61	0,1216	6,63615	563,5
P27	1956	0,704	30,2211	2,2751	36,81	2,0527	18,4167	1369
P28	1420	0,511	62,234	2,0556	50,28	1,7411	10,9717	994
P32	788	0,284	27,0598	1,0684	43,68	0,3149	5,91447	551,6
P33	839	0,302	40,648	1,0914	39,17	0,3485	5,96508	587,3
P34	835	0,301	16,609	0,499	35,82	-0,527	6,9375	584,5
P36	409	0,147	28,5036	0	50,5	-1,276	6,6853	286,3
P39	1001	0,36	33,0033	1,3317	33,13	0,6993	7,62133	700,7
P40	739	0,266	28,1588	1,0982	48,22	0,3585	5,49633	517,3
P41	661	0,238	36,6102	0,5664	46,58	-0,426	4,32967	462,7
P42	1292	0,465	30,1095	1,5832	38,78	1,0638	7,29093	904,4
P44	681	0,245	14,5794	0,5124	23,94	-0,507	6,01863	476,7
P46	-	-	25,3165	0,5822	47,42	-0,403	3,75602	0
P48	626	0,225	34,4086	-	31,71	-1,276	5,01115	438,2
M3	626	0,225	30,8911	1,1728	58,16	0,4676	5,55208	646,8
M4	924	0,333	21,6066	0,9209	38,51	0,0982	6,14437	621,6
M5	888	0,32	32,9268	1,5667	49	1,04	5,61752	642,6
M8	918	0,33	13,5429	0,1151	37,86	-1,102	5,40845	712,6
M9	1018	0,366	71,8135	9,5796	79,69	11,402	7,56918	677,6
M13	968	0,348	37,0828	1,4566	51,82	0,8807	5,9375	658,7
M14	941	0,339	13,541	0,1022	17,61	-1,122	6,89877	438,2

Tab. 31- Paramètres de la qualité de l'eau à l'irrigation. Octobre 2000

Le report des différents paramètres des tableaux (31, 31.1, 31.2 et 31.3) sur les diagrammes de Richards 1954, permet une interprétation qui conduira à localiser les types d'eau et par conséquent les diverses utilisations (variétés de cultures).

Puits	CE	P. osmo.	% Na ⁺	SAR	IP%	ESP	SP	RS
P02	590	0,212	54,8564	0,5556	9,484	-0,442	3,30839	413
P51	669	0,241	28,5853	0,4293	7,054	-0,631	3,94777	468,3
P11	539	0,194	25,0405	0,4636	7,837	-0,58	3,77069	377,3
P05	1280	0,461	23,6784	0,826	11,87	-0,042	6,97741	896
P07	1859	0,669	42,2965	1,5449	19,17	1,0084	12,9431	1301
P30	766	0,276	22,4993	0,5894	9,433	-0,392	4,67547	536,2
P01	652	0,235	34,6057	0,9746	17,86	0,1773	4,63102	456,4
P13	986	0,355	28,4669	0,8627	13,54	0,0125	5,88894	690,2
P10	1539	0,554	30,6817	1,2797	16,81	0,6236	7,67342	1077
P06	1064	0,383	25,8512	0,8749	13,13	0,0305	5,76276	744,8
P33	808	0,291	46,5288	1,3464	25,53	0,7208	5,20569	565,6
P03	1031	0,371	30,4085	0,8996	14,68	0,0669	6,43691	721,7
P42	1428	0,514	35,0819	1,4712	21,21	0,9018	7,63718	999,6
P14	583	0,21	26,2903	0,5419	10,36	-0,463	4,20863	408,1
M3	785	0,283	29,8863	0,6898	12,96	-0,243	5,00308	549,5
P29	1606	0,578	36,1381	1,5071	18,77	0,9537	8,84419	1124
P41	709	0,255	27,9644	0,6866	12,33	-0,248	4,51922	496,3
P12	833	0,3	24,9169	0,7618	11,29	-0,136	4,87265	583,1
P32	802	0,289	32,2472	0,9066	15,7	0,0772	5,18369	561,4

Tab. 31.1– Paramètres de la qualité de l'eau à l'irrigation. Juin 2002.

Puits	CE	P. osmo.	% Na ⁺	SAR	IP%	ESP	SP	RS
P1	1600	0,576	39,1746	2,5231	30,53	2,4024	10,6675	1120
P3	2700	0,972	48,0503	3,0066	36,36	3,0771	13,6915	1890
P4	3000	1,08	41,2676	2,676	30,7	2,6168	9,73494	2100
P6	5500	1,98	39,1209	2,5441	29,63	2,4319	11,5429	3850
P8	4600	1,656	42,2453	2,5824	29,83	2,4857	8,87224	3220
P10	2100	0,756	40,1868	2,5014	30,31	2,3719	10,0731	1470
P11	2800	1,008	42,348	2,6635	30,4	2,5993	9,71094	1960
P12	2400	0,864	40,8814	2,5218	29,6	2,4006	9,66353	1680
P16	3100	1,116	39,1913	2,6989	31,26	2,6488	10,1932	2170
P17	2100	0,756	39,4139	2,3874	28,37	2,2114	9,7709	1470
P21	1300	0,468	46,2278	2,7789	37,43	2,7605	12,6827	910
P22	2500	0,9	37,7836	2,2615	27,67	2,0336	11,2622	1750
P27	4200	1,512	40,5542	2,6562	29,95	2,5891	8,16409	2940
P28	3700	1,332	36,2145	2,2584	28,24	2,0291	12,2002	2590
P32	1500	0,54	37,9536	2,3852	29,47	2,2083	10,3759	1050
P52	1600	0,576	38,3424	2,4042	29,46	2,2351	10,6259	1120
P40	3100	1,116	35,9784	2,2493	27,99	2,0163	10,3315	2170
P41	1500	0,54	38,0847	2,3857	29,3	2,2089	10,3134	1050
P42	1400	0,504	39,5212	2,454	29,58	2,3052	12,5574	980
P46	2600	0,936	40,2751	2,2708	27,59	2,0467	10,6701	1820
P48	1600	0,576	38,8644	2,3832	29,06	2,2055	13,474	1120
P51	1200	0,432	38,6762	2,3918	28,91	2,2176	10,2841	840

Tab.31.2– Paramètres de la qualité de l'eau à l'irrigation. Octobre 2003.

Puits	CE	P. osmo.	% Na ⁺	SAR	IP%	ESP	SP	RS
P39	1100	0,396	79,2322	1,1583	41,9	0,4465	5,02612	770
P09	1800	0,648	80,1844	2,9866	55,07	3,0493	9,31719	1260
P08	800	0,288	84,3055	0,7408	43,82	-0,168	2,90933	560
P52	1300	0,468	84,3122	2,4748	59,9	2,3346	6,38116	910
P8-1	800	0,288	83,0939	0,7913	46,42	-0,093	3,451	560
P44	900	0,324	85,1356	1,2586	55,56	0,5929	3,66021	630
P14	800	0,288	84,9784	0,9087	49,81	0,0803	3,22183	560
P03	800	0,288	85,5567	1,0013	46,61	0,2165	4,75528	560
P31	1000	0,36	82,6944	1,3911	50,98	0,7856	4,82277	700
P07	600	0,216	87,7782	0,4313	57,51	-0,628	1,5534	420
P53	400	0,144	90,0761	0,2736	65,11	-0,864	1,24589	280
M8	900	0,324	78,9041	1,1166	51,17	0,3855	3,42928	630

Tab.31.3– Paramètres de la qualité de l'eau à l'irrigation. mars 2004.

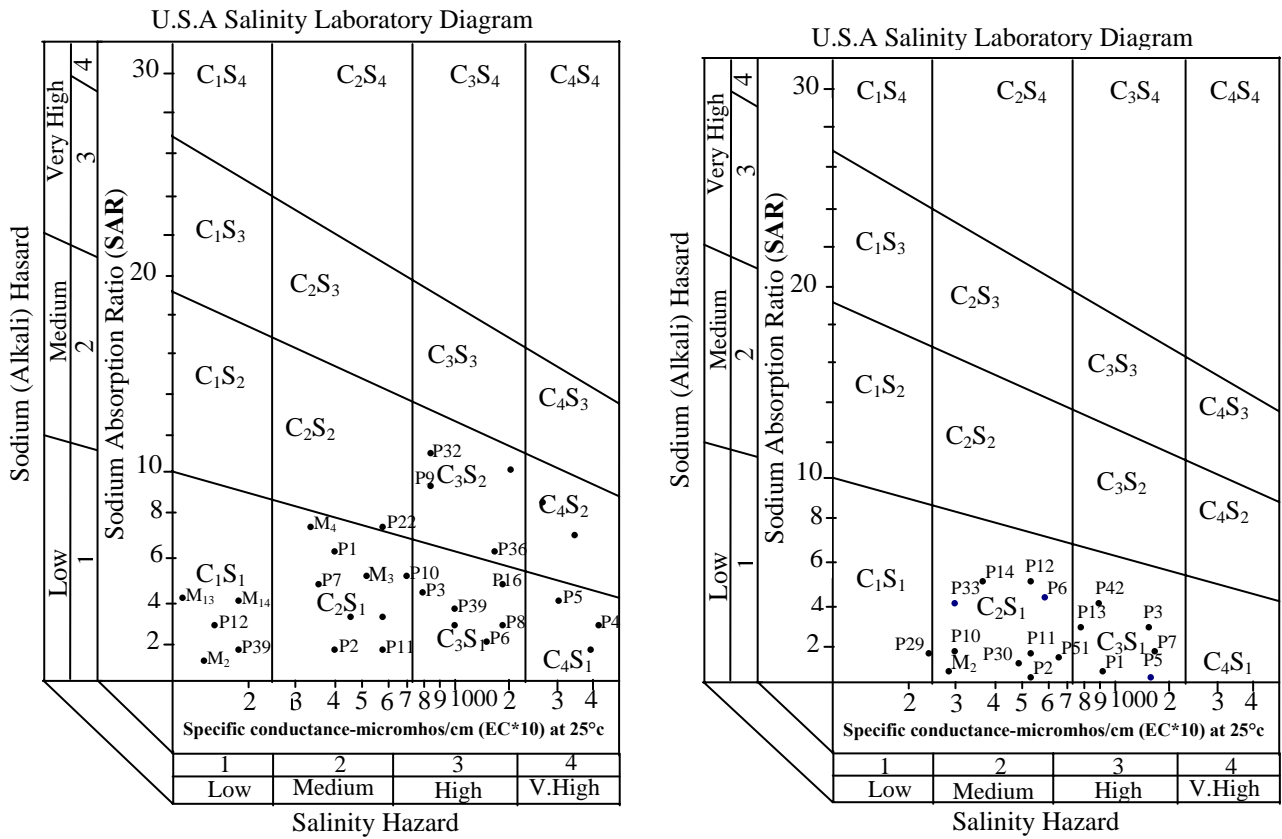
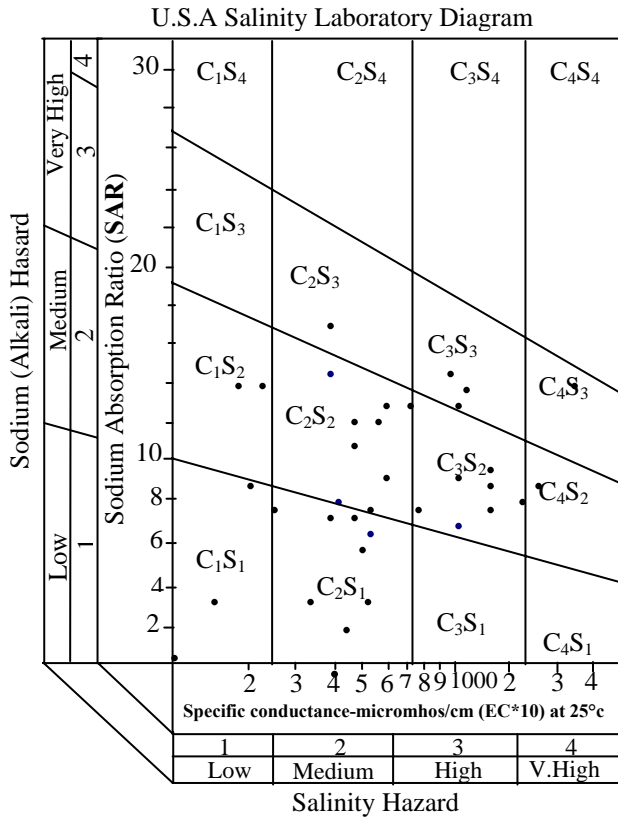


Fig.- 55- Diagrammes de Richards. 2000, 2002 et 2003



Octobre 2003

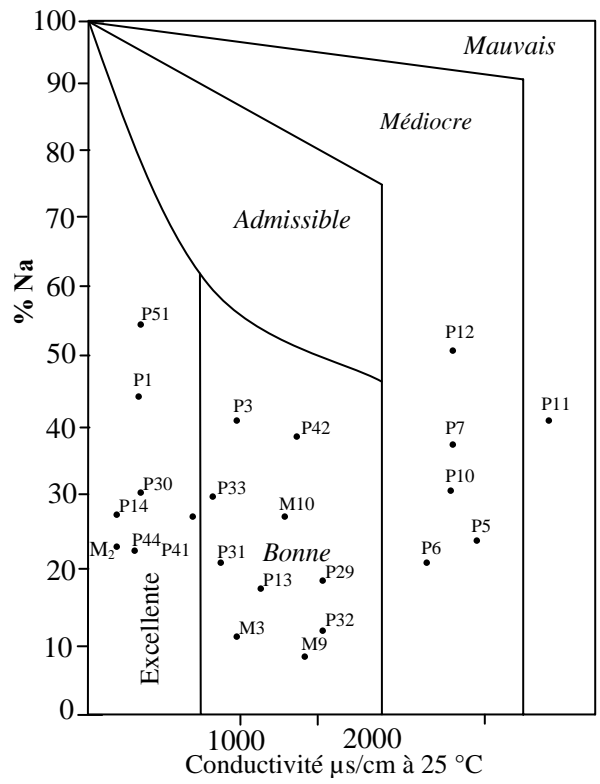
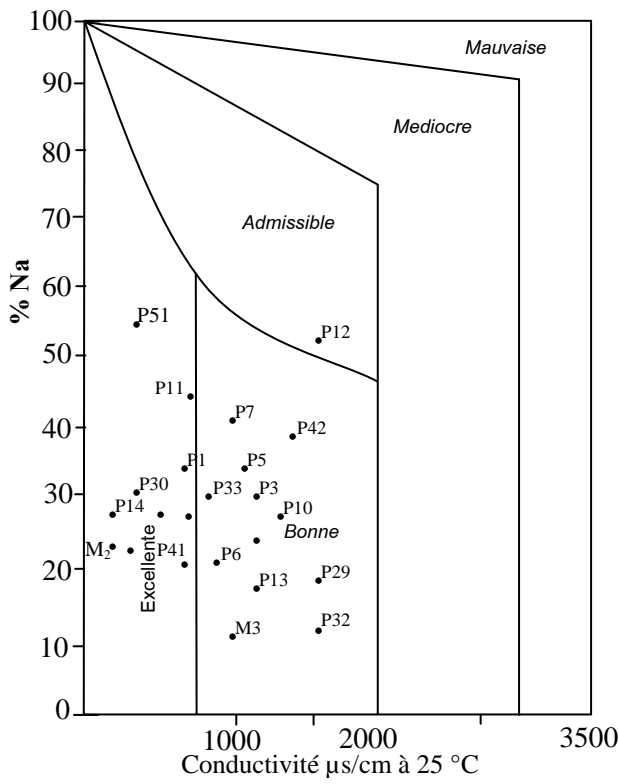
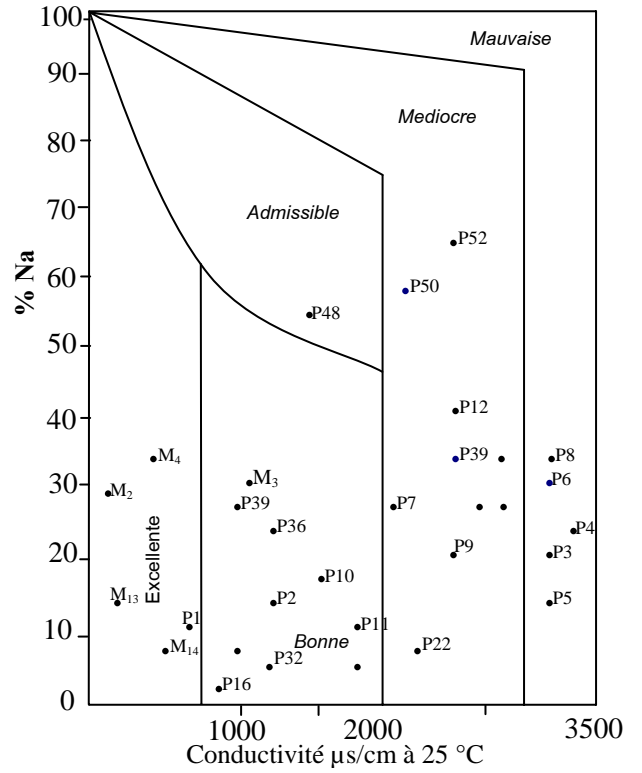


Fig. 55.1- Diagrammes de Wicox. 2000, 2002 et 2003

10.5. Interprétation des résultats des diagrammes.

1. Diagrammes de Richards (fig.55)

Quatre classes apparaissent : excellente, bonne, admissible et médiocre dont chaque classe présente ses propres caractéristiques. Le tableau suivant donne les résultats d'interprétation des diagrammes.

Région	El Ma El Abiod (tous secteurs)			
Période	Octobre 2000	Juin 2002	Octobre 2003	Mars 2004
classe				
Excellente	C ₁ S ₁			
Bonne	C ₂ S ₁	C ₂ S ₁	C ₂ S ₁	C ₂ S ₁
Admissible	C ₃ S ₁ - C ₃ S ₂	C ₃ S ₁ - C ₃ S ₂	C ₂ S ₁ - C ₃ S ₁	C ₃ S ₂
Médiocre	C ₃ S ₁ C ₃ S ₃	C ₃ S ₂	C ₂ S ₁ C ₂ S ₁	C ₃ S ₁
Mauvaise				
Caractéristiques				
C ₂ S ₁	Eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation			
C ₃ S ₁ - C ₃ S ₂	Eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes au sel sur sol ayant une bonne perméabilité			
C ₃ S ₃ - C ₄ S ₄	Eau ne convenant pas à l'irrigation			

Tab. 32- Résultats obtenus après interprétation des diagrammes de Richards

2. Diagrammes de Wilcox (fig.55.1)

Les eaux de la plaine présente les mêmes qualités au cours du temps, la dégradation observée traduit un changement dans la qualité de l'eau.

Région	El Ma El Abiod (tous secteurs)			
Période	Octobre 2000	Juin 2002	Octobre 2003	Mars 2004
classe				
Excellente	05	10	08	06
Bonne	10	12	10	08
Admissible	01	01	00	02
Médiocre	07	00	05	06
Mauvaise	05	01	03	02

Tab.33- Résultats obtenus après interprétation des diagrammes de Wilcox

Pour que l'interprétation ait un sens pratique, nous avons cartographié l'aptitude de ces eaux à l'irrigation, nous présenterons les cartes qui se rapportent au début de la période d'observation, sachant que l'ensemble des cartes présente la même répartition.

10.6. Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation selon le diagramme de Richard (Octobre 2000)

La carte fait ressortir trois catégories d'eaux :

Les eaux de bonne qualité sont celles issues des sables qui reposent sur les grès, se localisant au Nord-Est du terrain. Les eaux de qualité admissible à médiocre occupent l'Ouest du terrain. Les eaux de mauvaise qualité se localisent au centre du terrain au lieu dit M'Taguinaro et au sud (fig.56). Elles s'expliquent par la nature des formations en ces deux endroits.

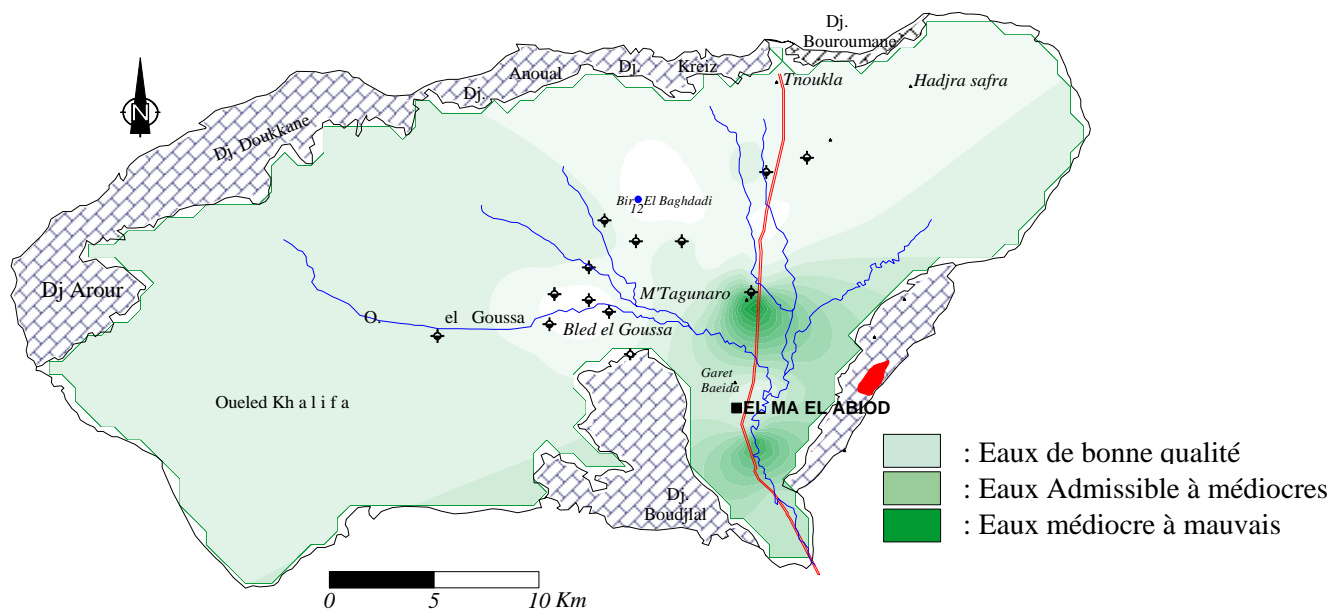


Fig. 56– Carte d’aptitude des eaux à l’irrigation selon le diagramme de Richard
Période d’Octobre 2000.

10.7. Carte d’aptitude des eaux à l’irrigation selon le diagramme de Wilcox (Octobre 2000)

La carte (fig.57) établie selon l’interprétation du diagramme de Wilcox confirme les constatations de la première carte. Les eaux de mauvaise qualité se localisent au centre à M’Tagunaro où les conductivité sont élevées, puisque les eaux en cet endroit sont salées et chargées (forage M6). Au sud et à l’ouest d’El Goussa les eaux sont de qualité admissible, et sur le reste du terrain les eaux présentent une bonne qualité.

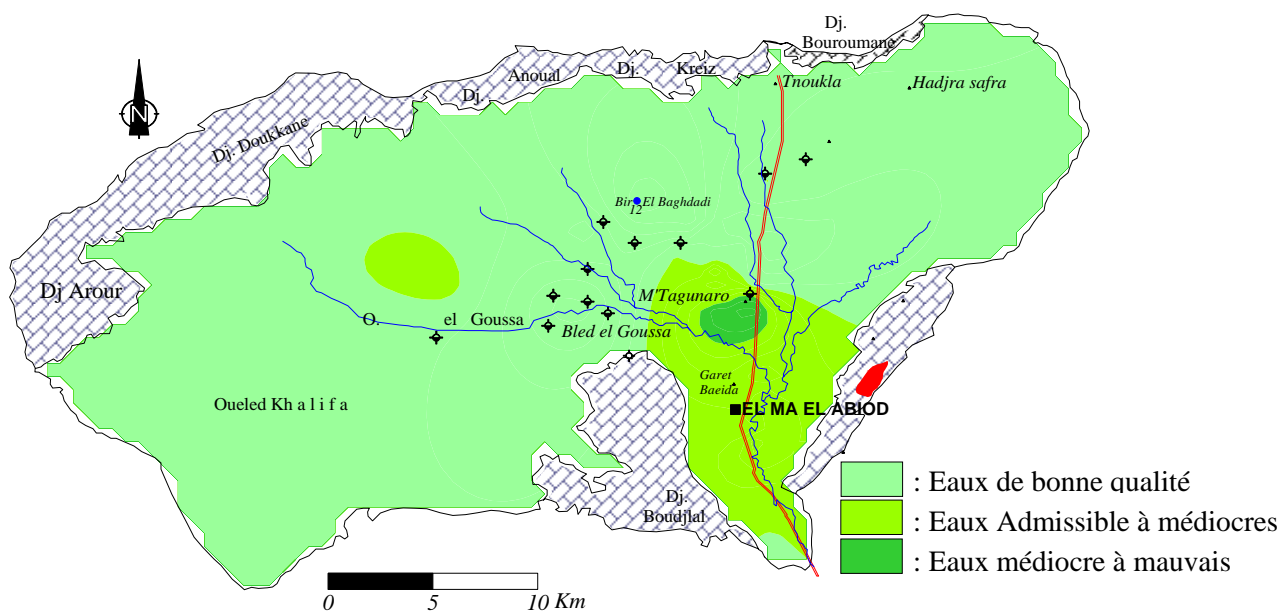


Fig. 57 – Carte d’aptitude des eaux à l’irrigation selon le diagramme de Wilcox
Période d’Octobre 2000.

En conclusion, durant la période d'observation une dégradation de la qualité des eaux, a été remarquée, très remarquable au sud et au centre du terrain. Elle est due essentiellement aux facteurs suivants qui peuvent engendrer l'évolution constatée :

- La géologie : la description lithologique a montré une hétérogénéité dans les formations (alluvions, argiles, sables, grès et les évaporites riches en Cl, Na, SO₄, et Ca) composant l'aquifère de la région d'El Ma EL Abiod qui favorise la minéralisation.
- Les facteurs climatiques : les région semi-arides sont généralement caractérisées par l'irrégularité de la pluviométrie, ce qui ne favorise pas le phénomène de dilution. Les fortes températures qui sévissent provoquent une forte évapotranspiration et par conséquent une augmentation de la salinité qui peut expliquer la dégradation de la qualité des eaux.

Un autre élément qui peut expliquer la mauvaise qualité rencontrée au centre, est le rejet de l'usine de ciment (poussières atmosphériques). Cette pollution nécessiterait une étude à part, confirmant ou infirmant ses risques sur la qualité des eaux, car nous avons constaté lors des campagnes de terrain, une dégradation dans le couvert végétale aux alentours immédiats de ce secteur.

Chapitre 6

***VULNERABILITE
A LA POLLUTION CHIMIQUE
DES EAUX SOUTERRAINES DU SYSTEME
AQUIFERE DE LA PLAINE
D'EL MA EL ABIOD***

1. INTRODUCTION

Devant l'état de contamination des eaux souterraines et le développement des techniques de décontamination des nappes polluées qui restent longues coûteuses et incapables de restaurer la potabilité des eaux, la nouvelle stratégie de protection de ressources en eau qui doit être instaurée est de protéger et sauvegarder ces ressources dans leur gisement avant qu'elles ne soient contaminées. Cette stratégie sera basée sur l'élaboration d'un document cartographique (carte de vulnérabilité ou carte de sensibilité) que le gestionnaire de la ressource en eau pourra utiliser lors de l'implantation d'installations, qui, à des titres variés peuvent être des sources de pollution.

Le but de l'établissement de cette cartographie est de montrer quelles sont, suivant les terrains rencontrés en surface, les possibilités de pénétration et de propagation des polluants dans le terrain, de mieux apprécier la fragilité des captages d'eau potable existants, de mieux cerner les zones à risque lors du choix de nouveaux sites des captages, et de prévoir les mesures compensatoires à mettre en œuvre sur les infrastructures existantes ou à créer pour limiter les risques de pollution chronique ou accidentelle, diffuse ou ponctuelle .

2. La vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines :

La vulnérabilité à la pollution d'une nappe d'eau souterraine matérialise la facilité avec laquelle elle peut être atteinte par une pollution ; où l'homme intervient de diverses matières comme facteur de cette dernière.

Il faut signaler tout d'abord que cette pollution peut être engendrée par une source ponctuelle (décharge, cimetière, rejet d'eau usée brute, domestique ou industrielle, etc. ...), linéaire (réseau d'eau usée, réseau de drainage agricole, etc. ...).

Devant les nombreuses menaces de pollution, causées surtout par le développement industriel, on doit mettre en garde les responsables de l'administration et de l'industrie contre la pollution des nappes qui restent dans la majorité des cas l'unique ressource en eau de qualité, à réserver pour les usages nobles (en priorité pour consommation humaine).

La vulnérabilité d'une nappe à la pollution est une notion relative, non mesurable et sans dimension. La précision de son évaluation dépend essentiellement de la nature, de la qualité et de la fiabilité des données utilisées. Sa caractérisation est basée généralement sur l'estimation d'un certain nombre de paramètres plus ou moins importants relatifs notamment à la couverture de la nappe (sol et zone non saturée) et à la zone saturée proprement dite.

Les cartes de vulnérabilité montrent quelles sont, suivant les terrains rencontrés en surface et les réservoirs contenant la première nappe d'eau souterraine, les possibilités de pénétration et de propagation des polluants dans ces terrains. La vulnérabilité à la pollution doit être considérée sous trois aspects :

A- L'introduction de polluant dans les nappes, c'est-à-dire le transit, selon un trajet surtout vertical, de corps polluants, entraînés par les eaux d'infiltration ou des fluides polluants depuis la surface du sol jusqu'à une nappe souterraine, à travers le sol et des roches non saturées d'eau.

B- La propagation de la pollution ; l'écoulement de l'eau ainsi polluée, entraînée par le mouvement naturel de la nappe atteinte ; elle peut entrer plus ou moins rapidement, selon les caractéristiques de l'aquifère et la pente.

C- La persistance plus ou moins prolongée, après la suppression du foyer de pollution : cette durée de séjour est fonction du renouvellement naturel de l'eau dans l'aquifère et également de la nature du polluant.

3. LES MÉTHODES D'ESTIMATION DE LA VULNERABILITE

Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution sont très nombreuses. Chacun élaborant sa méthode selon ses besoins. La multiplicité des méthodes provient aussi bien des objectifs recherchés (la réglementation, les activités humaines, les polluants), que du nombre d'organismes qui développent leur propre méthode pour une utilisation spécifique à leur pays.

Il est difficile de sélectionner une méthode d'évaluation de la vulnérabilité. Diverses raisons peuvent motiver le choix d'une méthode par rapport à une autre. Dans notre cas, protection des eaux souterraines, la sélection est mise sur les méthodes intrinsèques.

Les méthodes peuvent être réparties en trois groupes (Tab. 35) : (1) les méthodes cartographiques qui se basent sur la superposition de cartes. (2) les méthodes des systèmes paramétriques qui utilisent un système de cotation numérique et (3) les méthodes analytiques qui se réfèrent aux équations.

D'après Vrba et Zaporozec (1994), d'un point de vue qualitatif, il est possible d'indiquer la corrélation entre trois facteurs (la densité de points, la quantité d'information pour les points, le dénominateur d'échelle) par rapport au type de méthode. Ainsi les méthodes analytiques complexes s'utilisent à petite échelle et nécessitent une densité de points importante. Pour une densité de points moyenne, une méthode à cotation numérique sera préférablement utilisée. Enfin, dans les zones où la quantité d'information est moindre, c'est une méthode cartographique à grande échelle qui sera recommandée.

Le nombre de paramètres varie aussi d'une méthode à l'autre : il se situe souvent entre 3 et 4, mais il est rarement supérieur à 7. Une méthode utilisant un nombre important de paramètres ne nécessite pas forcément plus d'informations qu'une méthode en utilisant moins. En effet, si on prend l'exemple de DRASTIC, SCAM et AVI, les deux premières méthodes utilisent sept paramètres. Les sept paramètres de SCAM font référence au sol, alors que ceux de DRASTIC sont plus diversifiés. La méthode AVI n'utilise que deux paramètres, mais pour chacun de ces paramètres, plusieurs caractéristiques sont considérées (Tableau 35)

Dans la présente étude, trois méthodes ont été appliquées : la méthode DRASTIC, la méthode BRGM et la méthode des indices de contaminations (Kherici 1993). Tableau 36

D'un auteur à l'autre, un paramètre n'est pas déterminé de la même manière, c'est-à-dire avec les mêmes processus et propriétés (tableau 37). Ce que certains auteurs utiliseront comme paramètres, d'autres l'incluront dans la détermination et la mise au point d'un autre paramètre. Ainsi, pour la méthode DRASTIC, en assumant que le contaminant a la mobilité de l'eau et qu'il atteint la nappe par infiltration des précipitations (Aller et al. 1987, Rosen, 1994), cela donne l'impression que le système décrit la vulnérabilité à la recharge sans tenir

compte des facteurs de dilution et de sorption. Pourtant Aller et al. (1987) expliquent que les processus tels que la sorption, la dispersion, la réactivité et le temps de passage sont considérés dans la mise au point des indices et échelles des paramètres.

Type de méthodes	Paramètres																											
	Précipitation/Composition chimique	Végétation / Occupation du sol	Température	Topographie	Densité du réseau d'écoulement	Épaisseur / texture	Matère organique	Porosité	Saturation	perméabilité	Propriétés physique et chimique	Densité	Lien aquifère / eau de surface	Différenciation par couche	Fluctuation du niveau de la nappe	Recharge	Caractéristique zones non saturée	Profondeur à la nappe	Caractéristiques Hydrogéol. Z.S	Conductivité hydraulique	Différenciation aquifère captif	Puits de captage	Distance horizontal. au contaminant	Solubilité dans l'eau	Coefficient de partition	Taux de dégradation	Coefficient de dispersion	
Méthodes analytiques	DRASTIC (Aller & al, 1987)			X	X											X	X	X	X	X	X							
	Farm A Stead				X	X			X	X							X	X										
	GOD (Foster & al.87)				X												X	X	X									
	M.D.Trojan, J.A Perry 88	X		X					X								X	X	X									
	SCAM (Zaporozec 1985)					X	X			X	X						X											
	SEEP AGE (J.S.Moore 1988)			X		X	X			X	X		X				X	X	X									
	SINTACS (Civita, 1990)			X	X	X							X				X	X	X	X	X			X				
	Sotornikova & Vrba 1987									X					X			X	X									
	WGWSW 1987					X					X							X	X									
	WISM (Schmidt 1987)					X			X	X								X	X									
	WSAP (KJ stempovoort 1990)					X	X			X	X																	
Méthodes cartographiques	Albinet & Margat BRGM											X					X	X	X	X								
	AVI (Stempvoort 1992)				X				X				X				X			X								
	Minnesota GSPW 1991				X												X	X			X							
	USGS (R.C.Berg 1984)			X	X					X						X		X	X									
Méthodes sys. paramétriques	AQUIPRO (R.N Passero 1988)					X											X					X						
	EVARISK (O.Banton 1997)		X	X	X	X	X		X	X			X		X	X	X											
	H.E Legrand (1983)																X	X				X						
	PESTANS (C.G Enfield 1982)							X		X	X					X								X	X	X	X	X
	PRZM (R.F. Carsel 1985)								X				X			X		X										
	SEEP / W	X								X							X	X										
	VULPEST (Villeneuve 1990)		X			X	X	X		X	X					X									X	X		

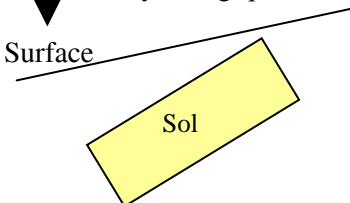
Tab.35– Méthodes et paramètres

Pour certains auteurs, les facteurs les plus importants sont les sols, la zone vadose, le type d'aquifère et la recharge. Alors que d'autres estiment la vulnérabilité par les dimensions et la nature des aquifères et des formations de couverture, les propriétés hydrauliques des formations, le comportement de l'eau souterraine dans les conditions naturelles ou non, les interactions entre les formations adjacentes, la nature et l'extension de la contamination.

Méthodes ↓	Paramètres →							
	Végétation / occupation des sols	Topographie	Épaisseur / Texture du sol	Caractéristiques zone non saturée	Profondeur à la nappe	Caractéristiques hydrogéologiques	Perméabilité	Concentration des éléments chimiques
DRASTIC (Aller & al. 1987)		X	X	X	X	X	X	
BRGM		X		X		X	X	
Indice de contamination		X	X		X	X	X	X

Tab. 36– Méthodes Choiesies

En fin, il y a ceux qui utilisent des paramètres peu courants pour l'estimation de la vulnérabilité intrinsèque, soit : les caractéristiques hydrogéologiques, la capacité de rétention (distribution de la taille des grains en zone non saturée et profondeur à la nappe) et le temps de passage du liquide (ce qui inclut la capacité d'infiltration, la vitesse moyenne du flux selon le milieu, le temps de parcours vertical et la présence ou non d'un sol).

ZONES	PROPRIETES	PROCESSUS
↓ Bilan hydrologique Surface 	Pente Porosité / Perméabilité Texture / Structure Épaisseur Pourcentage d'argile Matière organique	Infiltration Ruissellement Filtration Biodégradation Sorption Volatilisation Compensation
ZONE NON SATURÉE	Épaisseur Capillarite Perméabilité relative	Biodégradation Volatilisation Neutralisation Hydrolyse Oxydo-réduction Dispersion verticale
ZONE SATURÉE	Porosité effective Conductivité hydraulique Lithologie Direction d'écoulement	Dilution Transformations Biochimique

Tab. 37– Zones, Propriétés et Processus.

La quantité de données nécessaires à l'évaluation dépend de la méthode sélectionnée, des différents facteurs concernés et de l'échelle de l'estimation (Fig. 57.1). Il est préférable, dans la mesure du possible que pour chaque facteur hydrogéologique la densité d'information disponible soit suffisante pour être représentative du milieu.

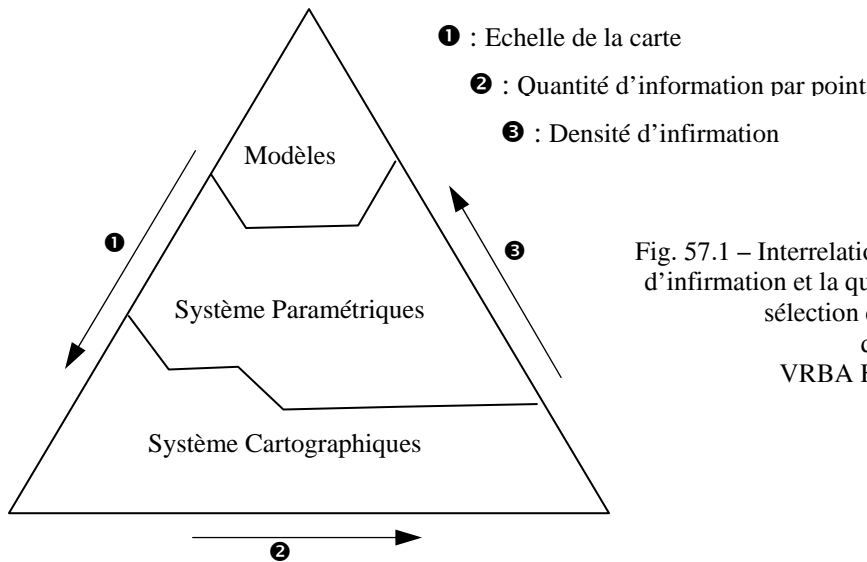


Fig. 57.1 – Interrelation entre l'échelle de la carte, la densité d'information et la quantité d'information par point pour la sélection des méthodes d'estimation de la vulnérabilité. VRBA ET ZAPOROZEC (1994),

4. VULNERABILITE DU SYSTEME AQUIFERE D'EL MA EL ABIOD

Afin de d'examiner la vulnérabilité du système aquifère d'El Ma El Abiod et les risques de pollution chimique de ce dernier, nous allons appliquer trois méthodes d'évaluation ; à savoir la méthode DRASTIC, la méthode BRGM et une troisième qui se base sur le calcul des indices de contamination où encore la vulnérabilité spécifique.

4.1. VULNERABILITE DU SYSTEME SELON LA METHODE DRASTIC

La méthode DRASTIC a été mise au point par l'EPA (Environmental Protection Agency) aux Etats-Unis en 1985 et Aller et al. en 1987, afin d'estimer le potentiel de pollution des eaux souterraines (Schneblen et al. 2002). Elle permet d'évaluer la vulnérabilité verticale en se basant sur sept critères :

- [D] : depth to groundwater (Distance à la nappe, épaisseur de la zone non saturée)
- [R] : recharge
- [A] : Aquifer media (nature de la zone saturée)
- [S] : Soil media (nature du sol)
- [T] : Topography (topographie, pente en %)
- [I] : Impact of the vadose zone (nature de la zone non saturée)
- [C] : Conductivity (perméabilité de l'aquifère).

Chaque critère est cartographié avec un index, appelé aussi note (n), allant typiquement de 1 à 10. Un facteur de pondération (p) est ensuite appliqué aux différents critères afin de relativiser leur importance respective en terme de vulnérabilité. L'index de vulnérabilité final (D_i) est la somme pondérée des sept paramètres selon la formule suivante :

$$Id = (Dn \times dp) + (Rn \times Rp) + (An \times Ap) + (Sn \times Sp) + (Tn \times Tp) + (In \times Ip) + (Cn \times Cp)$$
 où D,R,A,S,T,I,C, sont les paramètres cités plus haut :

- n : notation accordée à chaque paramètre
- p : facteur de pondération accordé à chaque paramètre.

Les cartes ainsi obtenues permettent de visualiser le degré relatif de vulnérabilité d'un secteur de la zone étudiée. Le potentiel de pollution augmente dans le même sens que l'index.

Les notations générales accordées aux sept paramètres de la méthode DRASTIC sont présentées dans le tableau 38. La notation 10 correspond au degré de vulnérabilité le plus élevé.

D : DISTANCE A LA NAPPE, EPAISSEUR DE LA ZONE NON SATUREE		R : RECHARGE (PLUIE EFFICACE)	
Valeurs en mètre	Notation	Valeurs en mm	Notation
0 - 1,5	10	25,5	9
1,5 - 4,5	9	17,5 - 25,5	8
4,5 - 9	7	10 - 17,5	6
9 - 15	5	5 10	3
15 - 22	3	0 - 5	1
22,5 - 30	2		
30	1		

A : NATURE DE LA ZONE SATUREE		S : NATURE DU SOL	
Calcaire karstique	10	Peu épais ou absent	10
Basalte	9	Gravier	10
Sable et gravier	8	Sables	9
Calcaire massif	6	Argile, agrégats	7
Grès massifs	6	Limon sableux	6
Métamorphique altéré	4	Limon	5
Métamorphique	3	Limon silteux	4
Shale massif	2	Limon argileux	3
		Argiles non agrégée	1

T : TOPOGRAPHIE, PENTE		I : NATURE DE LA ZONE NON SATUREE	
Valeurs en % de la pente	Notation		
0 - 2	10	Calcaire karstique	10
2 - 6	9	Sable et gravier	9
6 - 12	5	Sable et gravier avec silt et argile	8
12 - 18	3	Grès	6
18	1	Calcaire	6
		Silt/Argile	1

C : PERMEABILITE	
$9,4 \cdot 10^{-4}$ m/s	10
$4,7 \cdot 10^{-4} - 9,4 \cdot 10^{-4}$ m/s	8
$32,9 \cdot 10^{-5} - 4,7 \cdot 10^{-4}$ m/s	6
$14,7 \cdot 10^{-5} - 32,9 \cdot 10^{-5}$ m/s	4
$4,7 \cdot 10^{-5} - 14,7 \cdot 10^{-5}$ m/s	2
$4,7 \cdot 10^{-7} - 4,7 \cdot 10^{-5}$ m/s	1

Tab. 38 -Notations accordées aux paramètres de la méthode DRASTIC (Lallemand-Barrès, 1994)

La méthode propose aussi de système de pondération suivant les conditions d'occupation du sol (tab.39) : Occupation normale ou avec une occupation par une activité agricole intensive utilisant par exemple des produits phytosanitaires ou des fertilisants.

CRITERES	Facteurs de pondération	
	<u>Normal</u>	<u>Avec produit</u>
D : profondeur	5	5
R : recharge	4	4
A : Milieu aquifère (zone saturée)	3	3
S : Milieu sol au-dessus de la zone non saturée	2	5
T : Topographie	1	3
I : nature de la zone non saturée	5	4
C : perméabilité aquifère	3	2

Tab. 39 – Facteur de pondération

Il est à noter que seule la vulnérabilité intrinsèque qui est considéré dans la présente étude qui ne tient pas compte de la vulnérabilité spécifique,

4.1.1. Conditions d'utilisation de la méthode DRASTIC

Les conditions d'utilisation de la méthode sont les suivantes :

- Le contaminant est introduit à la surface du sol.
- Le contaminant arrive aux eaux souterraines par infiltration.
- Le contaminant a la mobilité de l'eau.
- La zone à évaluer est d'au moins 0,4km²

4.2. Construction de la carte de vulnérabilité

La méthode de définition de la vulnérabilité proposée pour la nappe des sables miocènes d'El Ma El Abiod sera donc la méthode à index avec pondération des critères de type DRASTIC (les critères propres à la nappe d'El Ma El Abiod sont sensiblement les mêmes que ceux utilisés par Aller et al, mis à part le type de nappe, la fracturation, les points sensibles et le biseau salé). L'échelle de la cartographie retenue est le 1/50.000

4.2.1. Profondeur de la nappe

La profondeur de la nappe est déterminée parce que le transport des polluants et leur évolution se fait dans le sol et le sous sol, le poids attribué est de l'ordre de cinq (5) du fait qu'elle contrôle la pollution. L'autoépuration peut s'effectuer seulement dans le cas où la profondeur est grande

La répartition des indices pour ce paramètre est reportée sur le tableau 40.

Intervalle	Profondeur de la nappe (m)		Dn.Dp
	Dn	Dp	
4,5 – 9	7	5	35
9 – 15	5	5	25
15 – 23	3	5	15
23 – 31	2	5	10
31 et plus	1	5	5

Tab. 40 – Notation et pondération selon la profondeur

Les indices ainsi calculés nous ont permis de dresser la carte correspondante (fig.58). Elle fait ressortir de forts indices au niveau de Bir El Baghdadi et à El Ma El Abiod. La partie centrale est caractérisée par les indices suivants : 25, 15 et 10 au secteur ouest et nord-est l'indice est égal à 5.

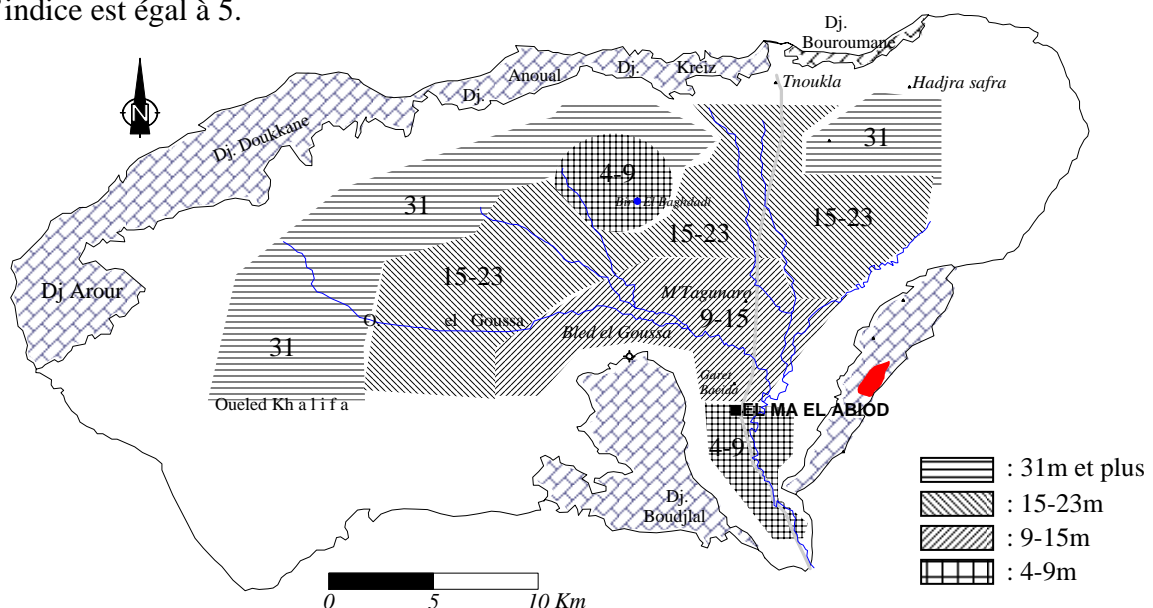


Fig. 58 - Carte de la profondeur d'eau et des indices

4.2.2. La recharge efficace

Elle concerne la quantité d'eau franchissant la surface du sol pour renouveler les stocks d'eau souterraine et entretenir le débit de l'écoulement souterrain, après circulation dans les formations hydrogéologiques du sous-sol.

Pour la présente étude, et compte tenu des données climatologiques, cette quantité est estimée à 10mm sur l'ensemble du bassin versant.

Intervalle	Recharge annuelle en (cm)		
	Rn	Rp	Rn.Rp
0-5	1	4	4

Tab. 41 – Notation et pondération selon la recharge efficace

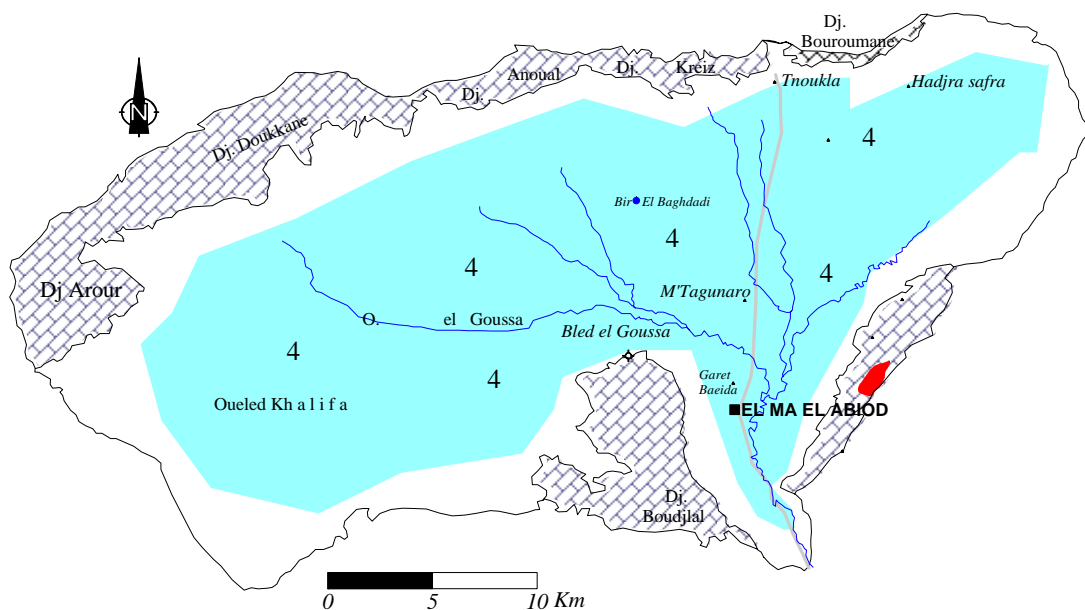


Fig. 59 - Carte de la recharge efficace et des indices correspondants.

La carte met en évidence la même répartition de la recharge efficace sur tout le territoire de la zone d'étude. Cette répartition reflète les calculs effectués, qui ont donné une valeur de recharge efficace égale à 14mm, soit 1,4 cm.

4.2.3. Nature de la zone saturée

Elle désigne le matériau de l'aquifère, pour cela nous avons utilisé les logs des forages, captant l'aquifère principal. Les puits creusés dans les formations quaternaires nous également été utiles, et nous ont permis de cerner l'aquifère principal, formé essentiellement de sables et par endroit d'argiles sableuses. (environs de Bir El Baghdadi)

	Nature de la zone saturée		
	An	Ap	An.Ap
sables	8	3	24
Sables et grés calcaires	8	3	24
Gravier et argiles sableuse	6	3	18
	8	3	24

Tab.42 – Notation et pondération selon la nature de la zone saturée

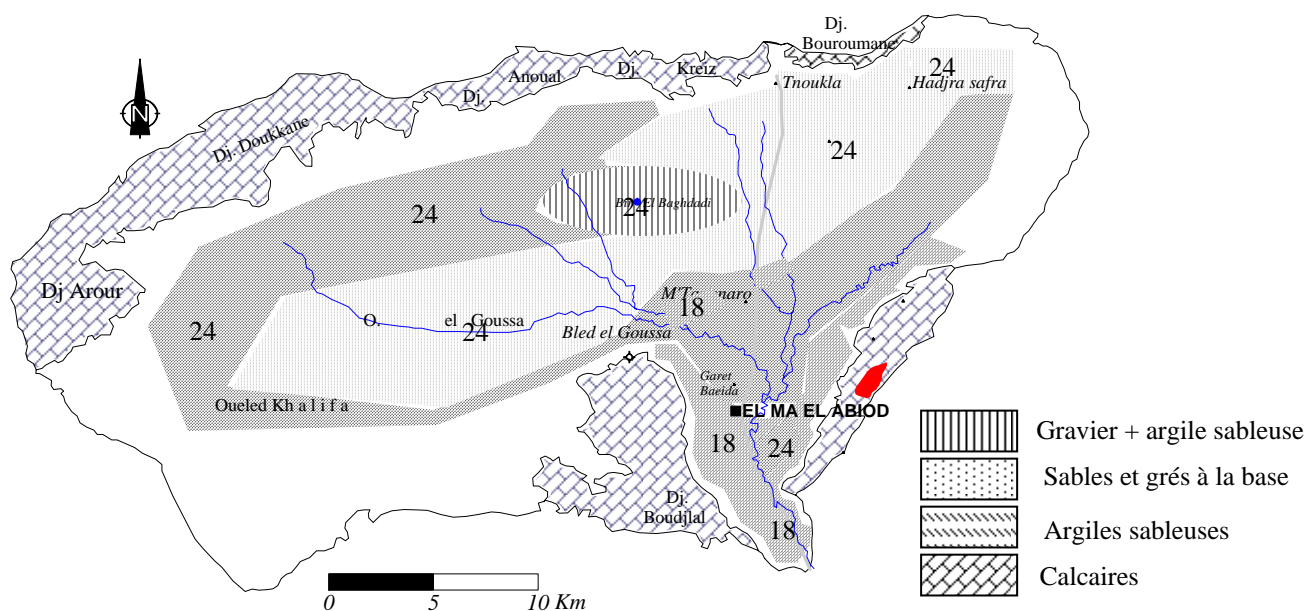


Fig.60- Carte de la nature de la zone saturée et des indices correspondants.

Les forts indices caractérisent presque toute l'étendue du système à part les calcaires du centre à M'Taguinaro et au sud de la plaine.

4.2.4. La nature du sol

La surface du sol, par sa nature perméable ou imperméable, peut entraîner les polluants vers l'aquifère. Ce facteur joue un rôle important quant à la détermination des zones polluées. Les informations dégagées à partir de la carte géologique provisoire de DUROZY et nos observations lors des campagnes de terrain, ont permis de dégager la nature du sol.

	Nature du sol		
	Sn	Sp	Sn.Sp
Galets de calcaires	10	2	20
Sables	9	2	18
Gravier	10	2	20
Argile sableuse	6	2	12

Tab. 43– Notation et pondération selon la nature du sol

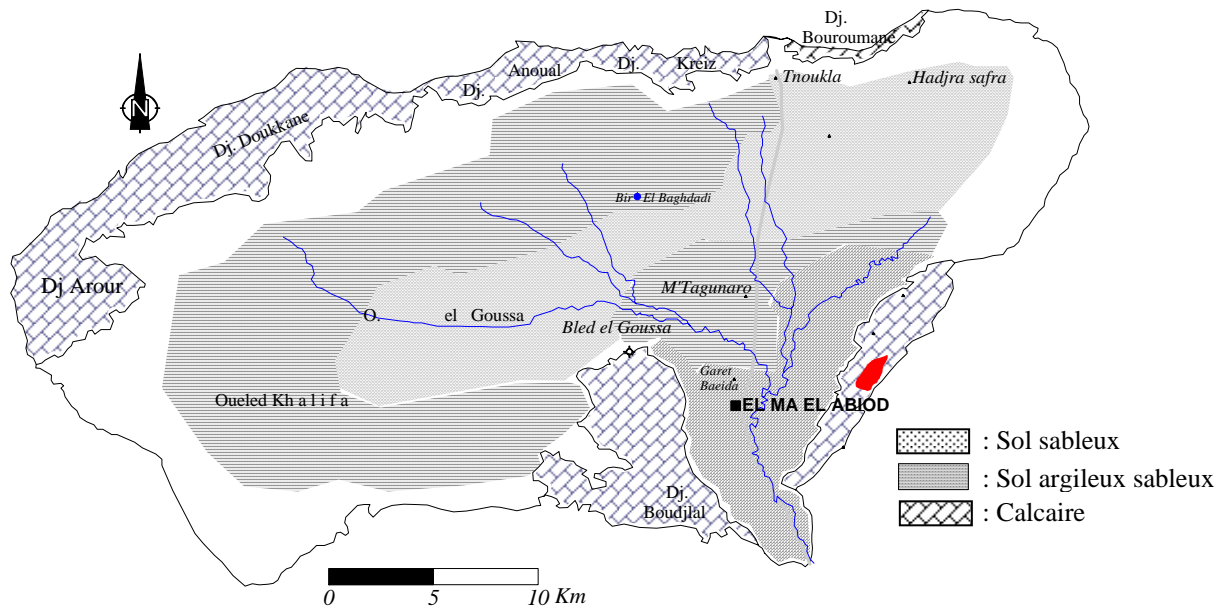


Fig. 61 - Carte de la nature du sol et des indices correspondants.

4.2.5. La topographie, la pente

La pente du terrain influe directement sur le temps de concentration des polluants, elle contrôle certains paramètres tels que l'infiltration. L'examen de la carte topographique de la région fait ressortir deux plages de pentes telles que présentées sur le tableau n°44 :

Topographie, Pente en % [$P = (h/d) * 100$]			
Intervalle	Tc	Tp	Tc.Tp
0 – 2%	10	3	30
2 – 6%	9	3	27

Tab. 44 – Notation et pondération selon la topographie du terrain.

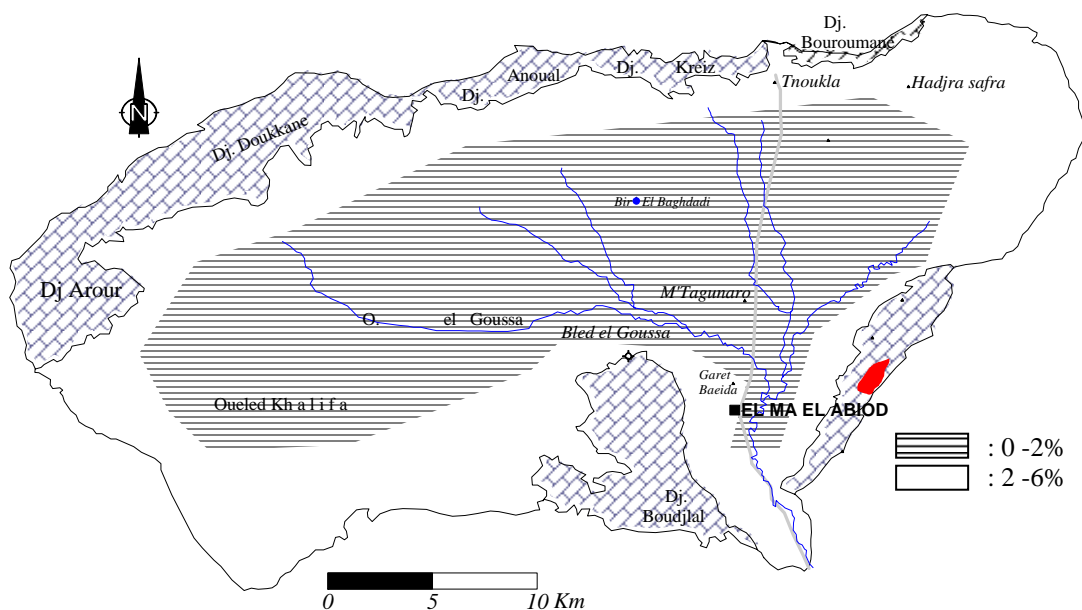


Fig.62- Carte de la Pente et des indices correspondants.

4.2.6. Nature de la zone non saturée (vadose)

L'impact de la zone non saturée est considéré comme étant un paramètre très important par la méthode DRASTIC, car la nature et l'épaisseur de la partie comprise entre la surface du sol et l'aquifère, contrôlent dans une certaine mesure la vulnérabilité à la pollution des réservoirs.

	Nature de la zone non saturée		
	In	Ip	In.Ip
grés	6	5	30
Sables et gravier	8	5	40
Argile sableuse	6	5	30
sables	6	5	30

Tab. 45– Notation et pondération selon la nature de la zone non saturée

Cette zone ne contient pas l'eau, mais dans certains cas, elle est caractérisée par une bonne perméabilité facilitant ainsi l'infiltration des eaux polluantes qui vont percoler vers la nappe.

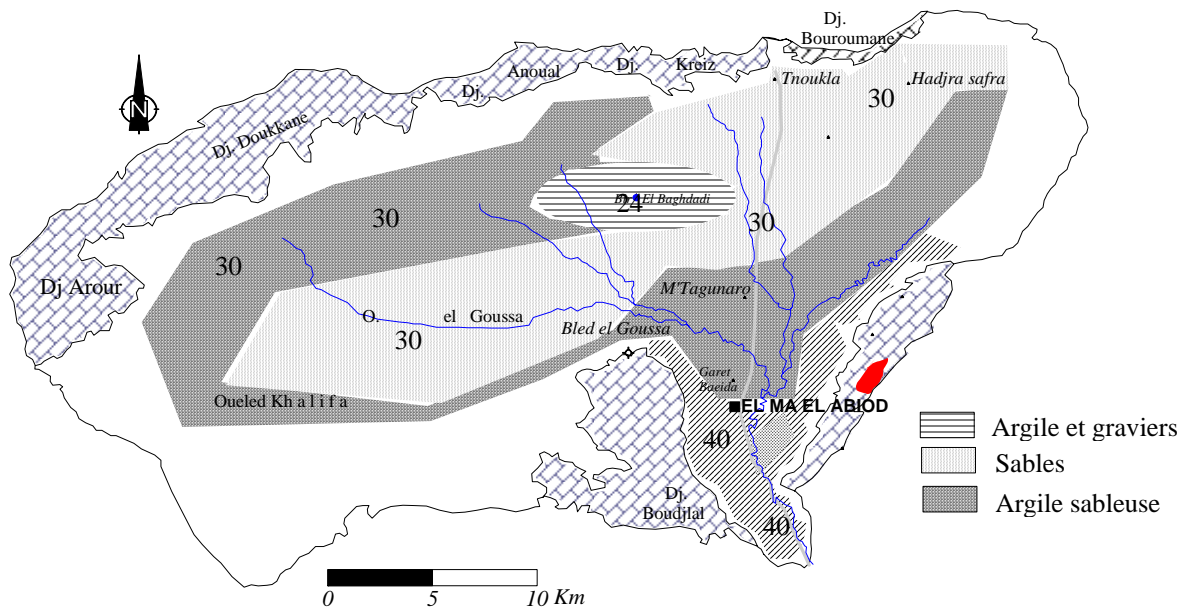


Fig.63- Carte de la zone non saturée et des indices correspondants.

4.2.7. La perméabilité

La perméabilité peut être considérée comme une vitesse à travers les terrains poreux traduite par le rapport entre la transmissivité et l'épaisseur de l'aquifère.

	Conductivité hydraulique m/j (perméabilité)		
	Cn	Cp	Cn.Cp
0.04 - 4	1	3	3
4 - 12	2	3	6
12 - 29	4	3	12
29 - 41	6	3	18

Tab.46 – Notation et pondération selon la perméabilité

La carte des perméabilités, comme déjà interprété, permet de dégager la répartition de ce paramètre à travers la plaine, ce que montre la figure n°64.

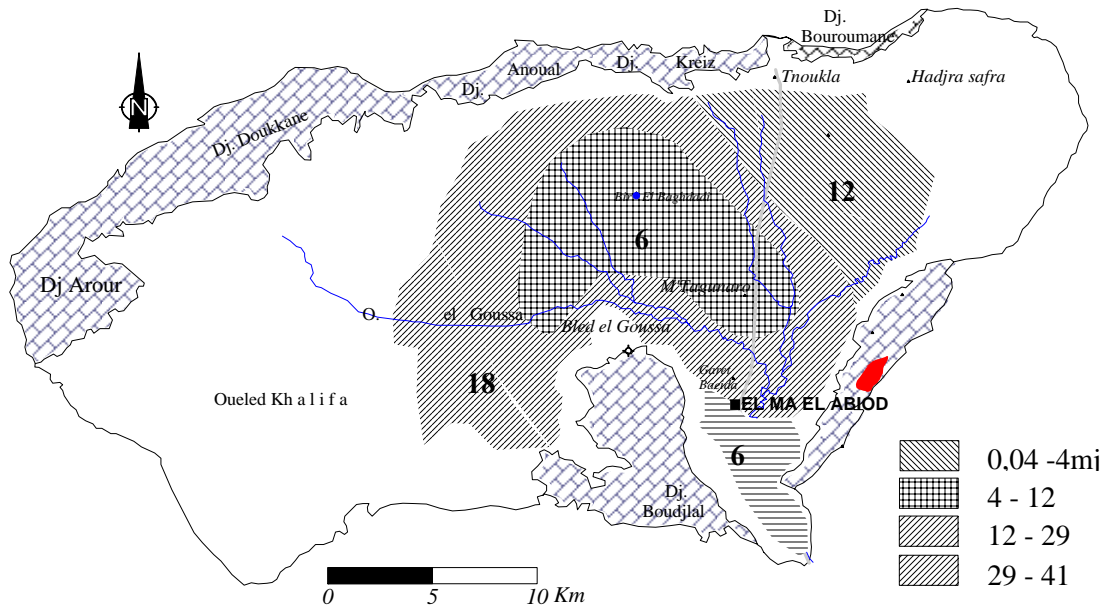


Fig. 64- Carte de la perméabilité et des indices correspondants.

4.2.8. La carte de vulnérabilité

En combinant les cartes des indices deux à deux, nous avons obtenu la carte finale des indices, qui par la suite nous permis de dresser la carte de vulnérabilité.

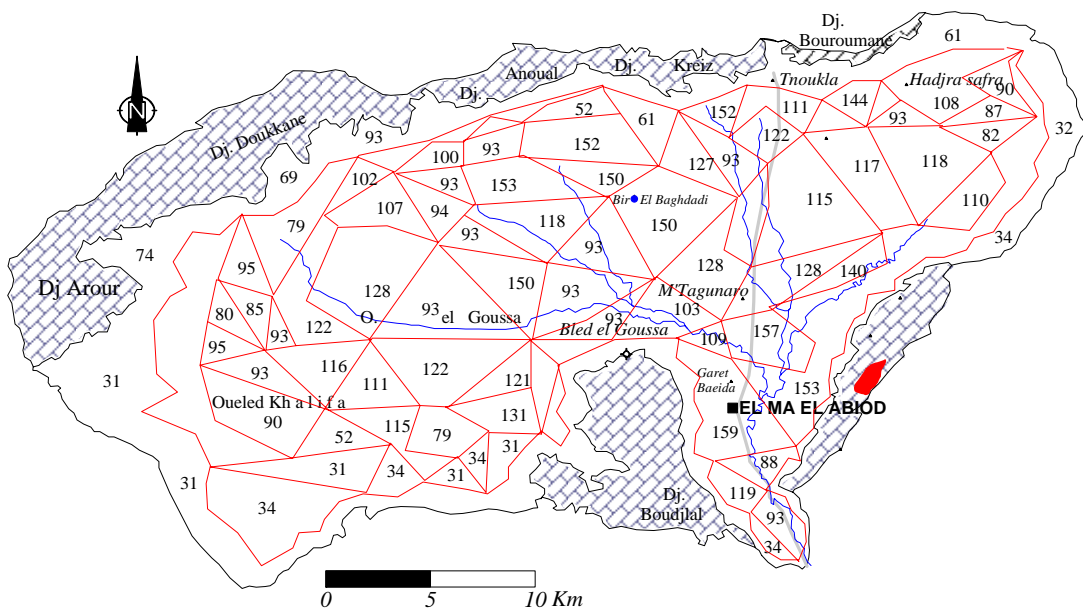


Fig.65- Carte des indices DRASTIC.

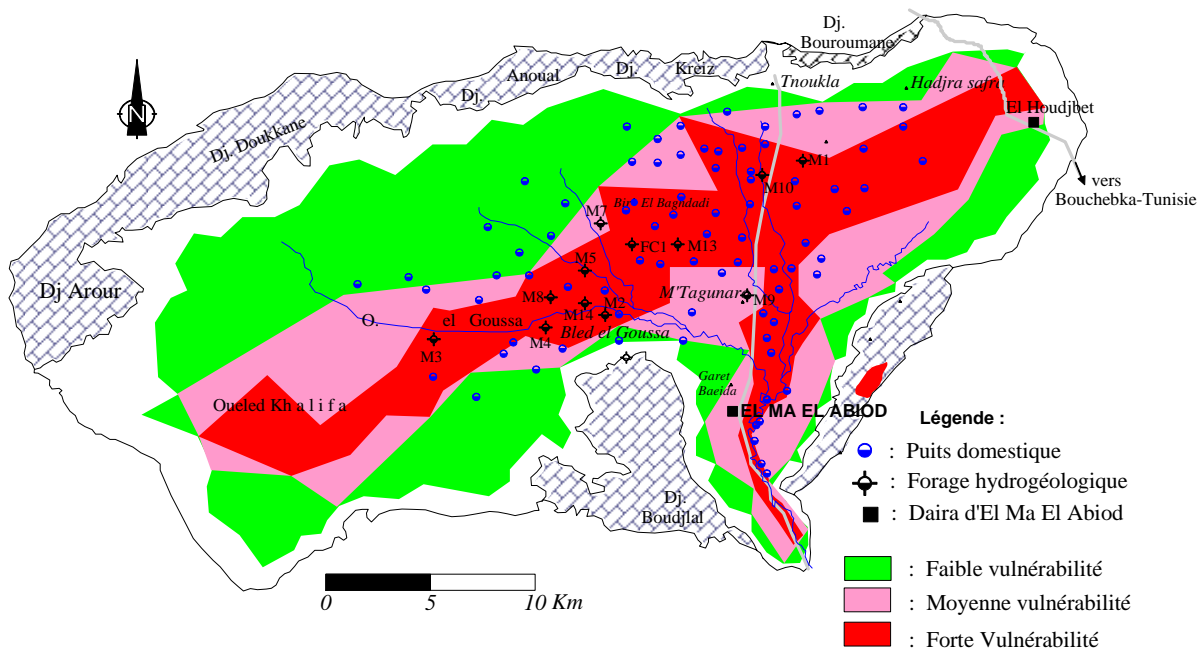


Fig. 66 - Carte de vulnérabilité selon la méthode DRASTIC.

La carte de vulnérabilité à la pollution chimique de la plaine d'El Ma El Abiod (fig.66), révèle trois zones de degré de vulnérabilité différente. Les zones de faible vulnérabilité se localisent dans le secteur périphérique de la plaine, la zone de moyenne vulnérabilité coïncide avec les secteurs où la couverture quaternaire dépasse les quatre mètres de puissance, alors que la zone vulnérable coïncide avec l'étendue de la nappe des sables miocènes.

5. VULNERABILITE DU SYSTEME SELON LA METHODE BRGM

Dans sa démarche, la méthode du Bureau de Recherche Géologique et Minières BRGM, s'appuie sur cinq paramètres qui sont : la pluie efficace, la pente du terrain, le type de perméabilité, les zones karstiques et l'épaisseur de la zone non saturée.

Critères	Intervalle	Vulnérabilité	
		Faible	Forte
Pluies efficaces (mm)	0 à 460	0	460
Pente (%)	0 à 46	46	0
Type de perméabilité	0 – 1 – 2 - 3	0	3
Zone karstiques	0 ou 1	0	1
Epaisseur de la ZNS	0 à 100	100	0

Tab. 47 – Combinaison des niveaux d'information

Chaque paramètre doit fournir des indications précises qui sont complétées par les informations tirées du paramètre suivant et ainsi de suite. La combinaison des informations obtenues permet de dresser une carte finale dite de vulnérabilité.

Le schéma suivant récapitule le principe de la méthode qui se base sur cinq critères et par la suite cinq cartes selon les étapes suivantes :

5.1. Les Etapes :

- 1- Découpage du territoire en cellules de 200m de coté (S= 5 873km²)

- 2- A chaque cellule, affectation d'une valeur, égale à la somme des coefficients de chaque critère (en pourcentage de l'intervalle)
- 3- Groupement des cellules en cinq (5) classes de valeurs – de très faible à très forte – exprimant le degré de vulnérabilité de la nappe.
- 4- Tracer de la carte de vulnérabilité.

Il faut dire que la méthode du BRGM ne diffère pas de la DRASTIC car elle tient en considération les plus importants des paramètres, dans un but de la rapidité pour la mise en oeuvre du document final.

Pour chacun des paramètres considérés par la méthode, on réalise une carte thématique sur laquelle sont délimitées les zones en fonction des intervalles qui seront définis selon la sensibilité de la zone.

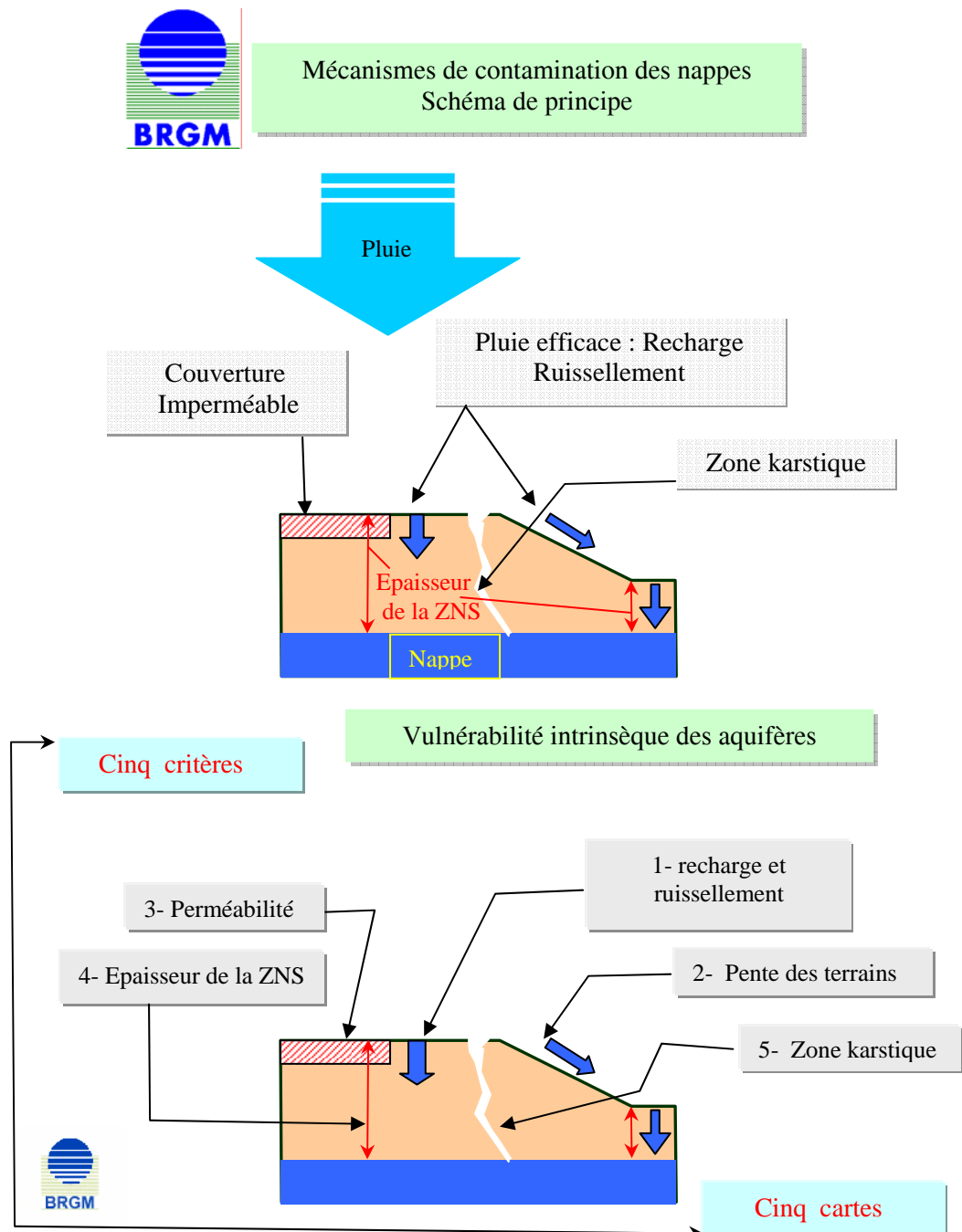


Fig. 67 – Le principe de la méthode du BRGM pour l'établissement de la carte de vulnérabilité

Selon les cartes de critères, la carte de vulnérabilité ne diffère pas de celle issue de la méthode DRASTIC puisque les cinq cartes sont déjà dressées au départ à la différence des intervalles qui présentent des variations minimales.

La carte finale (fig. 68) fait donc ressortir elle aussi trois secteurs de faible, de moyenne et de forte vulnérabilité.

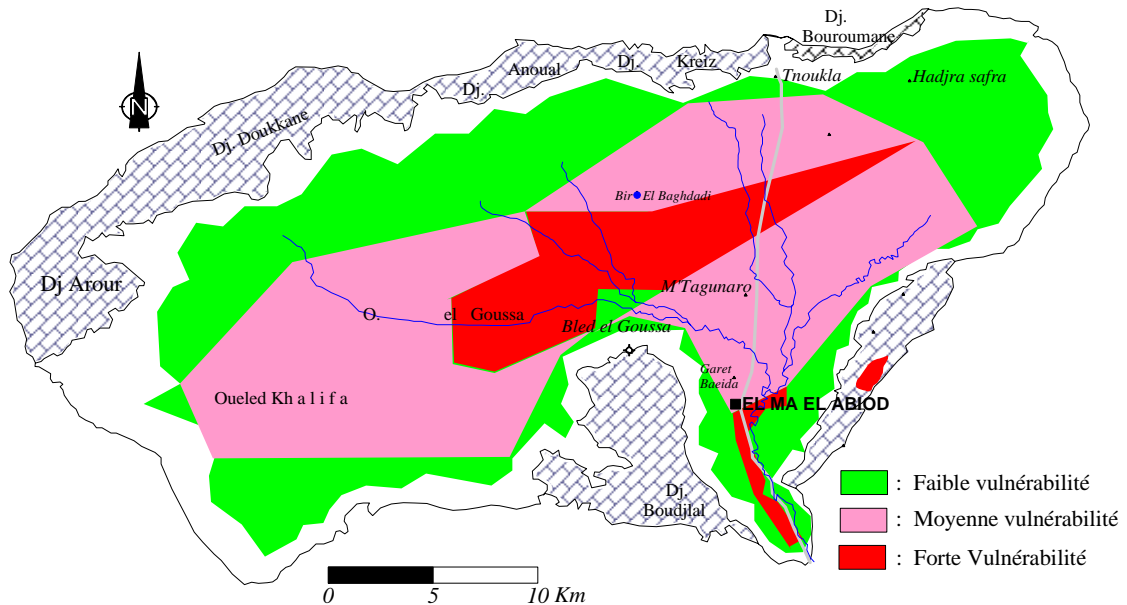


Fig.68- Carte de vulnérabilité selon la méthode du BRGM.

6. LE CALCUL DES INDICES DE CONTAMINATION

Les éléments apparus en abondance lors des analyses des campagnes hydrochimiques et lors de la cartographie de leur répartition dans l'espace (Rouabhia2001) semblent donc liés au lessivage des roches magasins et à l'activité humaine (élevage, épandage d'engrais, industrieetc.) En admettant des intervalles de classes en mg/l pour chaque élément et en les additionnant, on peut repérer des indices de contamination (Rouabhia & Kherici 2004), plus l'indice est élevé, plus le point de prélèvement est contaminé et donc vulnérable à la pollution.

$$L'indice est défini comme suit : IC = \sum [Na^+] + [SO_4^-] + [Cl^-] + [NO_3^-]$$

Sur les tableaux de calculs, les forts indices appartiennent géographiquement à la partie centrale et sud, quant aux faibles indices, ils sont localisés sur les bordures et la partie ouest du terrain.

Sur le tableau ci après, nous avons insisté sur la classe des nitrates car leurs dérivés sont reconnus plus toxiques que les autres éléments

Classe ions	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Na ⁺	Inf. À 250	250-500	500-750	750-1000	Supérieur à 1000	-	-	-	-
SO ⁻⁴	Inf. À 250	250-500	500-750	750-1000	Supérieur à 1000	-	-	-	-
Cl ⁻	Inf. À 250	250-500	500-750	750-1000	Supérieur à 1000	-	-	-	-
NO ⁻³	Inf. À 15	15-25	25-35	35-45	45-55	55-65	65-75	75-85	85-95

Tab.48 – Intervalles des classes

Ions, indices Puits	Na ⁺	SO ⁻⁴	Cl ⁻	NO ⁻³	I.C	Ions, indices Puits	Na ⁺	SO ⁻⁴	Cl ⁻	NO ⁻³	I.C
P1	1	1	1	03	6	P23	1	1	1	1	5
P3	1	02	1	8	12	P25	1	1	1	-	4
P4	1	2	2	1	6	P26	1	1	1	-	4
P6	2	5	3	10	20	P27	1	2	2	-	5
P7	3	1	4	10	18	P28	1	1	2	-	4
P8	1	3	2	8	14	P33	1	1	1	-	4
P10	1	2	1	8	12	P34	1	1	1	-	4
P11	1	1	1	8	11	P36	1	1	1	-	4
P12	1	1	1	8	12	P39	1	1	1	-	4
P15	1	1	1	2	5	P40	1	1	1	9	12
P17	1	1	1	3	6	P41	1	1	1		4
P18	1	1	1	4	7	P 42	1	1	1	5	8
P19	1	1	1	-	4	P44	1	1	1		4
P21	1	1	1	-	4	P46	1	1	1	6	9
P22	1	1	1	4	7	P48	1	1	1	5	8

Tab. 48.1- Les indices de contaminations [(I.C) : Indice de contamination]

L'élaboration de la carte de vulnérabilité est basée sur la superposition des cartes de perméabilité, de la profondeur du plan d'eau, de la nature du sol et des cartes de la répartition spatiale des indices de contamination. La carte finale permet de visualiser une zonation selon le degré de vulnérabilité (fort, moyen et faible).

La construction des différentes cartes des différents chapitres de cette thèse, ainsi que la superposition lors du traçage des cartes de vulnérabilité, ont été permis par l'utilisation du logiciel **Surfer 8.01, serial number WS-055032-117 under Windows XP, Version 5.1 Service Pack 2.** [http:// : www.goldensoftware.com](http://www.goldensoftware.com)

En annexe il est présenté un aperçu sur la cartographie, en utilisant la méthode d'interpolation triangulaire. Ainsi que l'organigramme du logiciel surfer et les six programmes dont il est composé.

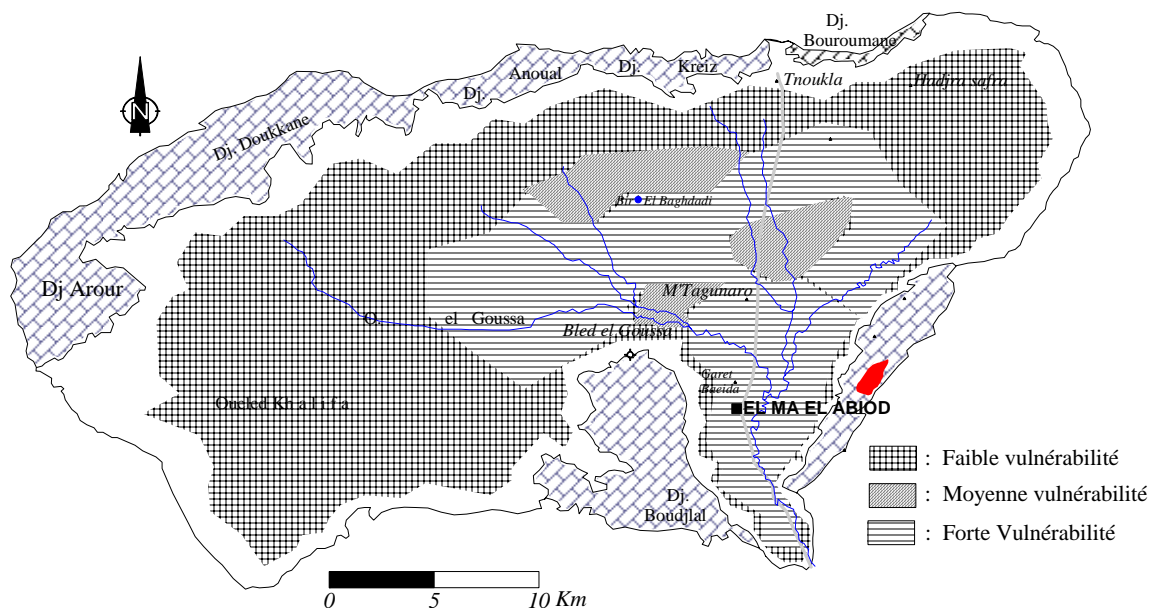


Fig. 69- Carte de vulnérabilité selon la méthode des indices de contamination.

6.1. Discussion des résultats

Il est bon d'analyser les résultats obtenus par chacune des méthodes en fonction de la répartition des valeurs d'indices sur la carte, mais il est également intéressant de comparer les cartes entre elles. Ainsi, en première analyse on remarque que la carte DRASTIC diffère des deux autres cartes, ce qui peut être dû au mode d'évaluation de la cartographie, puisque la méthode DRASTIC considère la pente comme un paramètre et qu'elle a pour effet de diminuer l'indice de vulnérabilité en raison du fort ruissellement retrouvé dans les secteurs à forts reliefs, cela expliquerait les variations d'indices par rapport aux autres méthodes.

Les deux cartes issues de la méthode BRGM et celle des indices de contaminations, se rassemblent sur le tiers de la carte qui correspond aux formations sableuses, cette formation ayant été cotée plus vulnérable par la méthode DRASTIC.

Dans l'ensemble, les cartes ne sont pas semblables (25% du territoire présentant les mêmes indices). Pour presque la moitié du territoire, les trois cartes sont homogènes.

Les cartes établies dans la présente thèse sont des cartes d'estimation de la sensibilité des nappes d'eau souterraines à la contamination de manière générale. Elles sont élaborées dans le but d'aider à l'aménagement du territoire. Elles ne montrent pas les zones contaminées ou susceptibles d'être contaminées, ni les zones qui ne peuvent être contaminées. Elles ne peuvent être utilisées pour l'interprétation et la prise de décision spécifique à des sites.

Il faut signaler aussi que, souvent, dans les diverses méthodes d'élaboration de ces cartes, les auteurs sont d'accord sur les paramètres à utiliser mais pas sur la manière de les combiner dans une estimation de vulnérabilité. Chacun élabore sa méthode selon ses besoins.

De ce fait, et en règle générale, les cartes de vulnérabilité ne sont pas comparables les unes aux autres du fait de la subjectivité du concepteur. Cependant les cartes comparées dans le cadre de cette thèse ont été réalisées sur un même territoire, en utilisant les mêmes types de

données, les mêmes technique d'estimation des paramètres et le même concepteur. Cela minimise les différences de perception et permet de valider pour les trois méthodes appliquées l'estimation de la vulnérabilité du système aquifère à la pollution.

7. Conclusion

Trois méthodes ont été adoptées pour la cartographie de la vulnérabilité à la pollution chimique de l'aquifère sableux de la plaine d'El Ma El Abiod, elles tiennent compte de plusieurs facteurs, tels que la lithologie, la péizométrie, l'hydrochimie. L'analyse des cartes obtenues a permis de distinguer trois zones de degré de vulnérabilité différent. Les zones de faible et moyenne vulnérabilité occupent respectivement 30 et 45% de la surface totale de la plaine, alors que les zones à forte vulnérabilité occupent 25% de cette surface totale.

***RISQUE DE POLLUTION
DES EAUX SOUTERRAINES
DE LA PLAINE D' EL MA EL ABIOD***

RISQUE DE POLLUTION DES EAUX

1. Introduction

La pollution des eaux souterraines est un problème majeur posé à l'interface des activités anthropiques et la ressource en eau, en particulier des eaux souterraines. Les dispositifs réglementaires ne permettent pas seuls de le solutionner et il faut agir de manière préventive ou curative au plus près des foyers de pollution c'est-à-dire aux niveaux de la parcelle, de l'exploitation et du bassin versant.

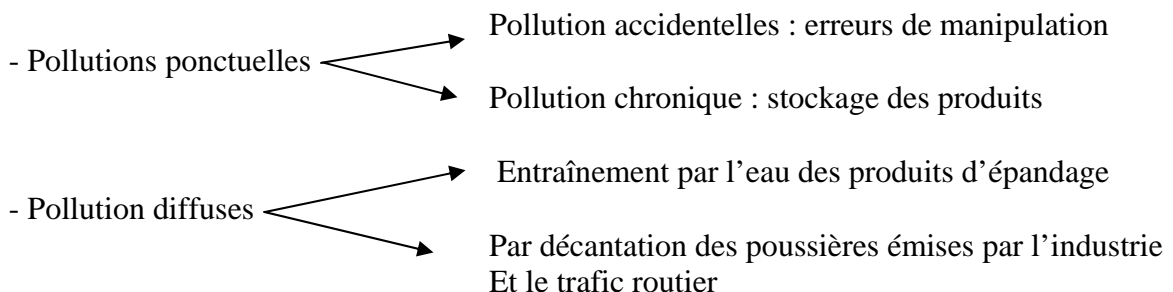
Le diagnostique préalable est nécessaire pour l'identification des zones prioritaires d'action. Les démarches de ce diagnostique ont notamment pour objectif l'estimation des risques de pollution chimique des eaux souterraines par la caractérisation des facteurs qui les identifient. Les méthodes de diagnostique actuellement mises en œuvres sont nombreuses et s'inscrivent à différentes échelles.

Pour le présent travail de thèse nous avons choisi, après modification (sur le moyen de la cartographie), une méthode analogue à celle de *Macary et al. (2005)* qui porte sur une échelle d'observation spatiale des phénomènes hydrogéologiques et aux foyers potentiels ou réels de pollution, à partir des fenêtres d'observation constituées par le maillage Lambert que permet la carte topographique 1.50 000 d'El Ma El Abiod.

Cette partie s'intéresse donc exclusivement au risque de pollution chimique des eaux souterraines de la région d'étude qui sera spatiale et qualitative, il s'agit de répondre à la question : quelles sont les zones ou secteurs les plus susceptibles de contribuer à la pollution des eaux du système aquifère de la région d'El Ma El Abiod ?

2. La notion de risque de pollution

En terme de pollution d'origine anthropique (notamment agricole et industrielle tel que notre cas), il convient de faire la distinction entre la pollution ponctuelle, due le plus souvent a des erreurs de manipulation, et celle diffuse, liée a l'émissions des rejets atmosphériques ou au traitement de cultures. Schématiquement il convient de noter :



La notion de risque et l'usage que nous en faisons doivent être précisés. Nous retiendrons pour ce travail de thèse le schéma suivant (fig. 70), en considérant que le risque réel ne peut être défini que par rapport à **un enjeu**, c'est à dire un usage de la ressource, et validé par des mesures. Nous emploierons donc le terme de risque potentiel (synonyme d'aléa

ou de potentiel de contamination), résultant de l'accroissement de la vulnérabilité du milieu et de la pression polluante. Pour cela, des indicateurs de pollution doivent être définis pour une meilleure localisation du risque.

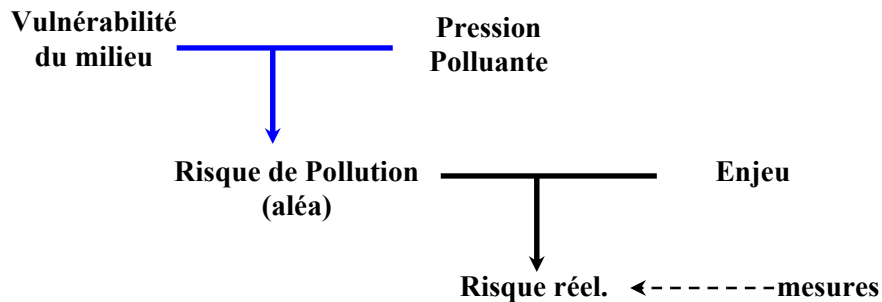


Fig. 70 – La notion de risque potentiel (Maurizi, Verrel, 2002)

3. Indicateurs de pollution

3.1. Définition

La bibliographie présente plusieurs définitions pour la notion d'indicateur de pollution. Il peut être un paramètre, ou une valeur dérivée d'autres paramètres donnant des informations sur un phénomène ou une situation, sur l'environnement considéré. Il est aussi une information quantitative, synthétique, caractérisant un phénomène souvent complexe. Elle est mobilisée à des fins de diagnostique, de communication ou d'aide à la décision.

Pour le cas de notre travail de thèse nous retiendrons la définition des indicateurs de pollution proposée par Macary et al. (2005) : « *les indicateurs de pollution sont une combinaison de variables descriptives, qui permettent d'obtenir une vision synthétique d'une situation ou d'un phénomène souvent complexe, et qui sont utilisés pour évaluer, suivre les impacts de la pollution sur le milieu, et favoriser l'aide à la décision* »

Cette conception, et puisque nous disposons de plusieurs indicateurs de pollution, principalement ceux d'ordre chimiques, nous permet de tracer une carte des risque de pollution des eaux souterraines de la région d'El Ma El Abiod. Cette carte tient compte des paramètres qui seront organisés selon le modèle préconisé initialement (Maurizi, Verrel, 2002).

Ainsi, la **pression polluante** sera définie pour notre cas par les apports anthropiques, alors que l'**état** est celui de la qualité des eaux, présenté lors de la cartographie de la vulnérabilité. Malheureusement, **la réponse** ne va représenter que l'ensemble des recommandations que nous allons énumérer par la suite. Elle résume en réalité les décisions qui concernent les changements des pratiques et des usages responsables des sources de pollution.

Il est à signaler qu'on peut utiliser un indicateur de type composite (et non pas simple) obtenu par l'agrégation de plusieurs variables.

3.2. Application

Pour dresser la carte de risques de la pollution des eaux souterraines de la plaine d'El Ma El Abiod, nous nous sommes basés sur l'indicateur composite constitué par les paramètres et variables suivants :

1- Paramètres :

- Topographie du terrain (Pente)
- Perméabilité
- Infiltration

2- Variables :

- Occupation des sols
- Teneurs en éléments chimiques
- Précipitations
- Sens d'écoulement (surface et souterrain)
- Epaisseur de la zone non saturée ou profondeur du plan d'eau

Ainsi, les foyers de pollution réel ou potentiels représentés par la figure (71) ont été pris en considération malgré le manque de mesures directes (lixiviation, analyse des poussières de rejets, analyse des eaux de retour d'irrigationetc.).

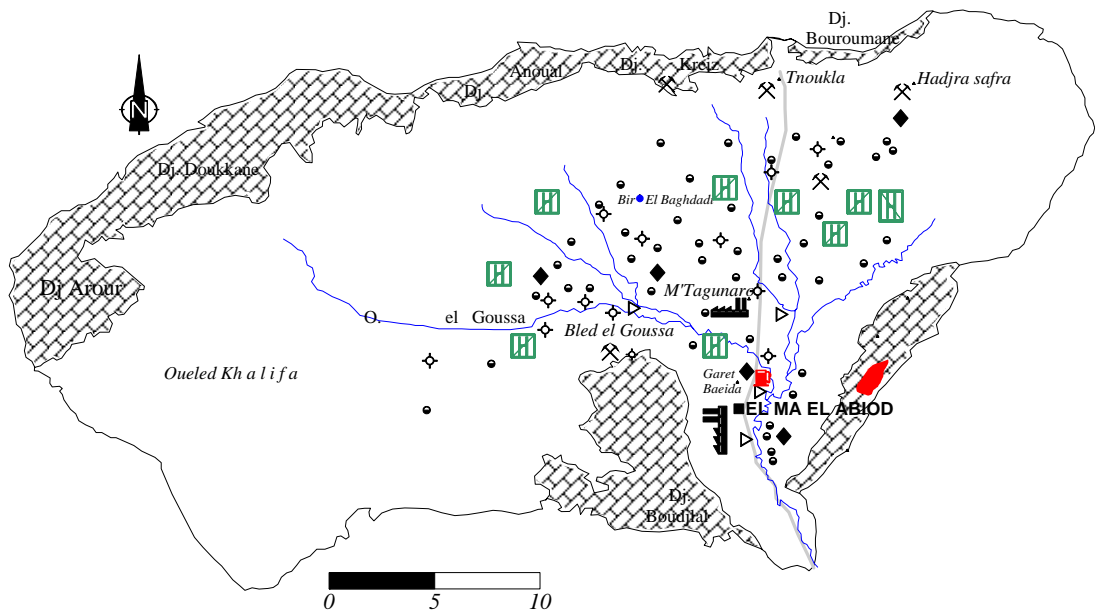


Fig. 71 - Carte des sources de pollution réelles ou potentielles des eaux
In ROUABHIA 2001,2004

Légende :

- : Puits
- ⊕ : Captage d'alimentation en eau potable avec périmètre de protection
- : Agglomération.
- ▧ : Elevage important et poulaillers
- (with factory icon) : Industrie (Ciments et tubes)
- ⚡ : exploitation minière (carrrière).
- ⛛ : Station services (carburants).
- ▷ : Rejet d'eau usée.
- : RN, Trafic routier
- ~ : Oueds
- ▧ (with plant icon) : Agriculture

Sur le maillage Lambert et à l'intérieur des mailles (1km²) nous avons rassemblé tous les indicateurs simples (Pente, Perméabilité, Infiltration, Concentration en éléments polluant : représentée par l'indice de contamination, profondeur du plan d'eau et vitesse d'écoulement) à chaque valeur d'indicateur nous avons affecter une note, la valeur résultant de la

multiplication des notes donne le degré du risque dans la surface considérée, ce qui revient au même, quand on fait la superposition des cartes thématiques représentant chaque indicateur de pollution.

De cette façon nous pouvons dresser les différentes cartes des différents indicateurs, tel que la carte de l'indicateur pente et l'indicateur « pression nitrates » qui tient compte du dépassement de la norme (50mg/l)

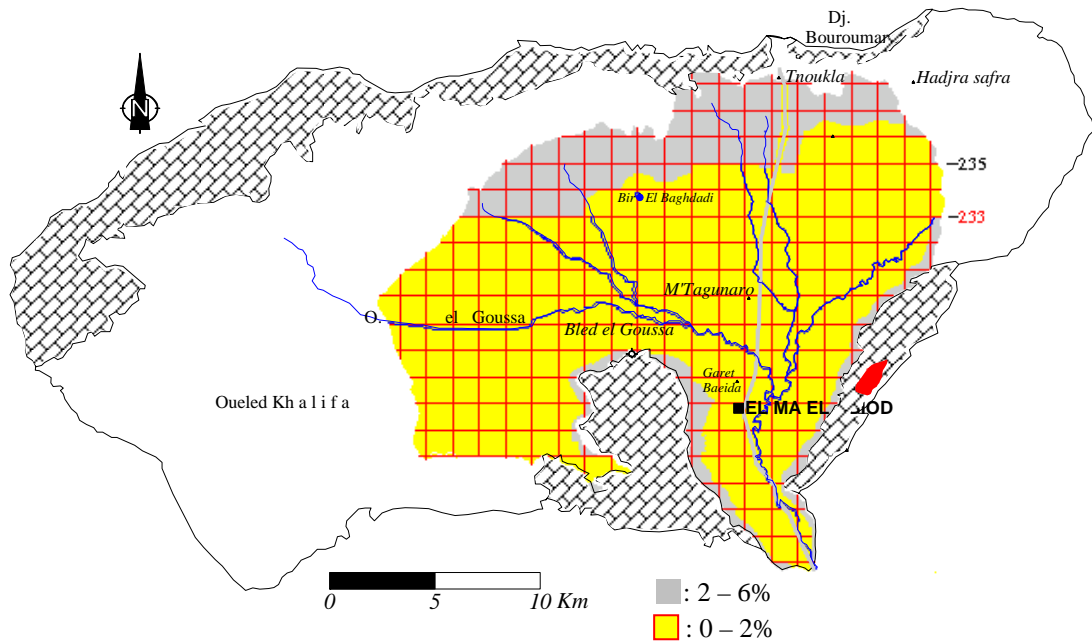


Fig. 72 –Carte de l'indicateur Pente

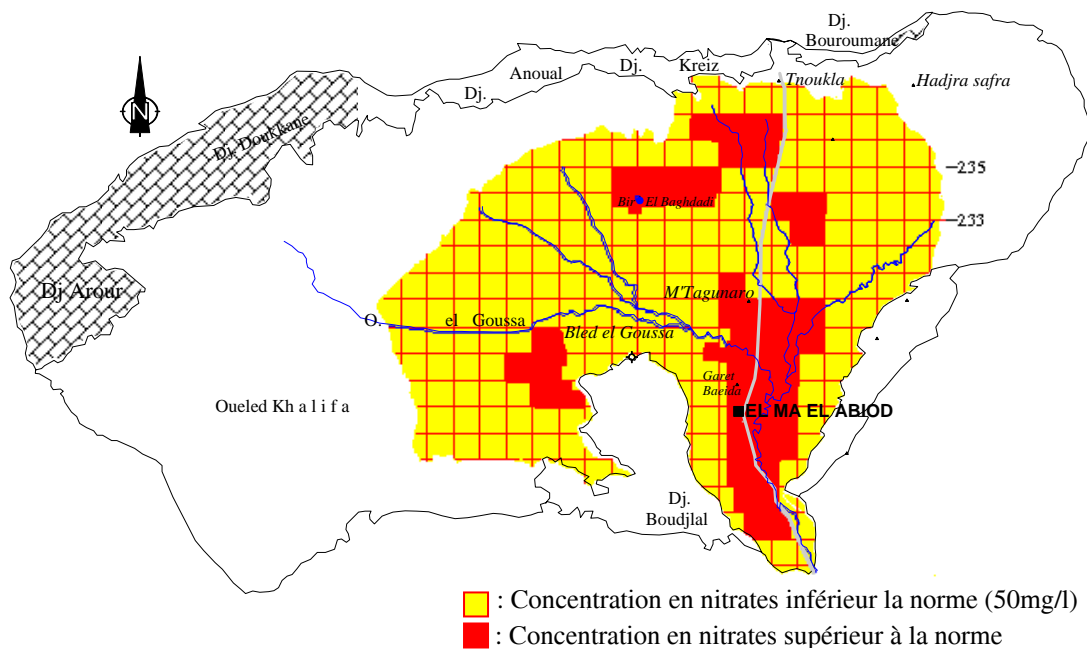


Fig. 73 – Carte de risque Nitrates (moyenne des campagnes 2000-2004)

L'ensemble des indicateurs ruinés dans les mailles ayant l'ensemble d'observations nous a permis de calculer un indice de risque à partir de la multiplication des valeurs de ces indicateurs.

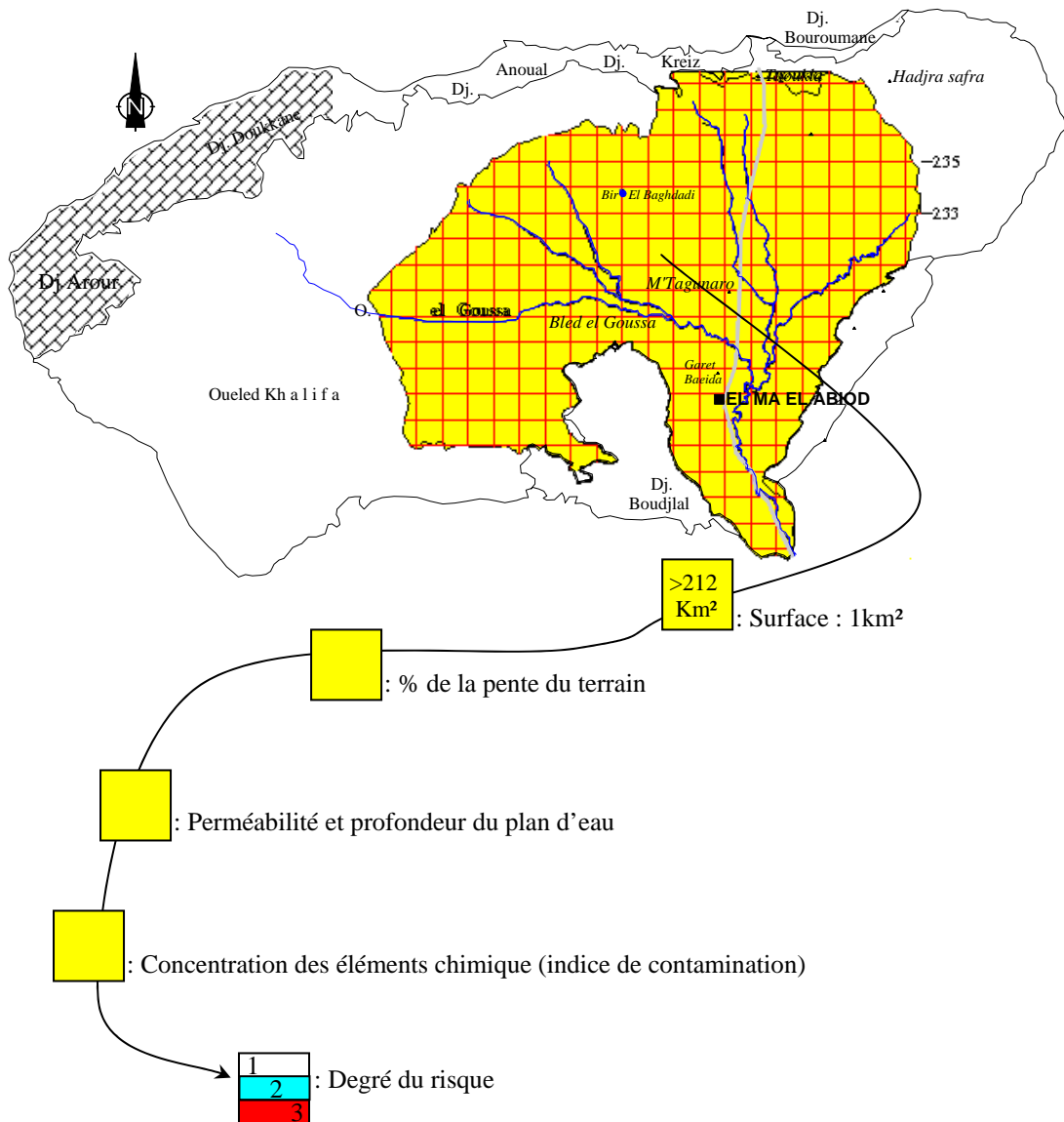


Fig. 74 – Construction d'un indicateur de pollution

4. Carte de risque des pollutions

En se basant sur la carte topographique, d'El Ma El Abiod (feuille 206), à l'échelle 1/50 000, et en utilisant toutes les informations recueillies au départ, nous avons donc dressé la carte des risques de pollution (fig.75), qui permet de visualiser les secteurs présentant différents degrés de risque qui diminue de l'intérieur vers l'extérieur de la plaine. Les lieux des agglomérations et les parcelles cultivables sont les plus exposés.

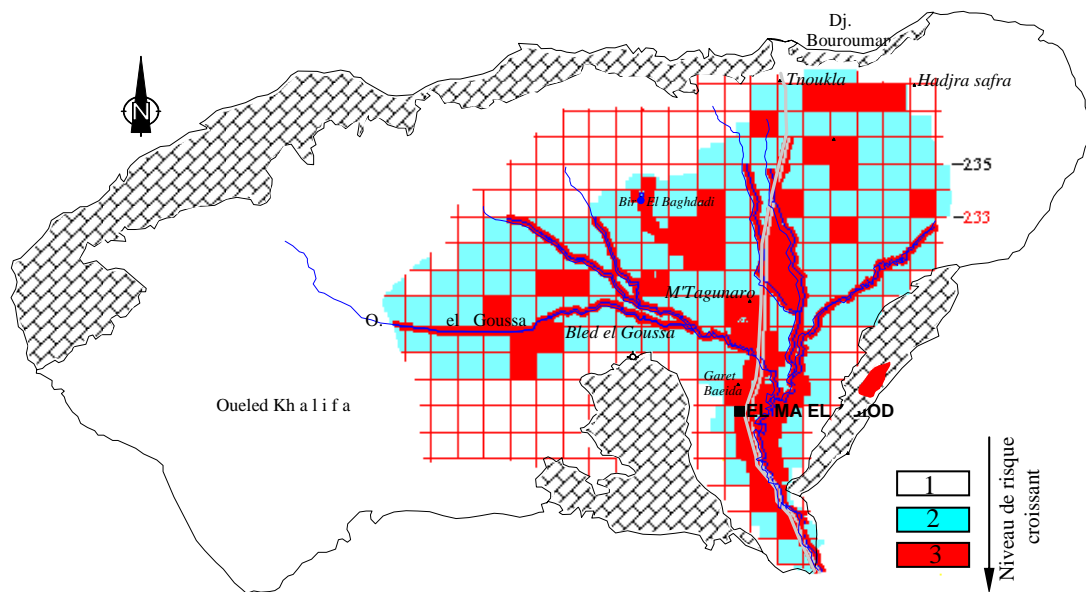


Fig. 75 – Carte de risque des pollutions d’origine anthropique des eaux souterraines de la plaine d’El Ma El Abiod

5. Conclusion

La carte met en évidence trois secteurs à risques différents qui coïncident parfaitement avec les cartes de vulnérabilité déjà tracées.

La méthode de cartographie du risque permet de comparer les secteurs de la plaine entre eux et de les hiérarchiser selon le risque potentiel de pollution des eaux souterraines qu’ils représentent, les cartes acquises et la méthode aident à la définition des zones prioritaires d’action et au dialogue entre acteurs en leur fournissant une méthode et un document commun, pour un développement durable au niveau de la plaine d’El Ma El Abiod.

Les données utilisées offrent une couverture spatiale satisfaisante, et constituent une alternative intéressante aux démarches de diagnostic du risque de pollution des eaux souterraines. Il est ainsi possible d’identifier rapidement les zones d’action prioritaires où des études plus détaillées doivent être mises en œuvre en vue d’émettre des préconisations.

CONCLUSIONS

1. DU POINT DE VUE SCIENTIFIQUE

Les différents chapitres de notre étude ont fait l'objet de conclusions partielles, aussi, résumons-nous brièvement les résultats obtenus.

Etude géologique :

Dans un premier temps, nous avons dégagé les premières remarques sur l'évolution géologique de la région. Il s'agit d'un haut plateau où on peut distinguer deux grands ensembles :

- Les affleurements de bordure d'âge Crétacé ;
- Les formations d'âge Miocène et Quaternaire occupant la totalité de la plaine.

La plaine se présente comme une cuvette, dont le substratum crétacé, calcaireux et marneux, est séparé du Miocène, qui constitue la réserve principale de la région, par des éboulis très perméables.

Etude climatologique :

Le climat de la région étudiée est steppique influencé par les facteurs géographiques (altitude, éloignement de la mer et orientation des versants des montagnes) et par les facteurs atmosphériques essentiellement imposés par le régime sub-saharien. Les précipitations, dont la moyenne annuelle est de l'ordre de 224 mm/an, ont lieu à la fin de l'hiver et au début de l'été, résultant d'un contraste thermique dû à la présence de massifs élevés entourant la plaine, provoquant des mouvements convectifs qui sont à l'origine de pluies orageuses très fréquentes.

Le bilan hydrique et l'estimation de ses paramètres nous ont permis de faire ressortir une évapotranspiration réelle de l'ordre de 208 mm/an, une infiltration et un ruissellement respectivement de l'ordre de 10 mm/an et 6mm/an.

Etude hydrogéologique :

On distingue deux types de nappes :

- Une nappe contenue dans les formations quaternaires, formée d'alluvions et de graviers, actuellement, sans intérêt hydrogéologique et de faible épaisseur.
- Une deuxième formée par les sables du Miocène et qui est très sollicitée, notamment, durant la dernière décennie.

L'écoulement converge vers le sud (l'exutoire), dont les principaux axes sont : Est Centre, Ouest-Sud et Centre Sud. L'alimentation se fait, uniquement, par les précipitations : soit par infiltration sur l'impluvium de la nappe, soit à partir du massif calcaire de bordure. Les conditions aux limites de ce système prennent en considération ce mode d'alimentation.

Le système révèle un bilan hydrogéologique négatif, caractéristique d'un climat semi-aride dominé par les mouvements ascendants de l'eau et une sécheresse progressive de l'aquifère.

Du point de vue transmissivité et perméabilité : deux secteurs s'avèrent intéressants ; le premier à l'Ouest à Bled El Goussa et l'autre à l'Est à Dra el Hrakel

Les retours d'eau d'irrigation vers la nappe, ont été estimés et qui sont fonction des débits de pompage dont l'effet a été observé sur les cartes piézométriques.

Etude hydrochimique

Les fortes minéralisations observées ne sont pas dues, uniquement, à l'évapotranspiration mais elles sont attribuables à une mise en solution au niveau des sols ou dans l'aquifère d'une part, et à l'activité anthropique d'autre part. Cette situation a été confirmée par les résultats de l'analyse en composantes principales.

La cartographie hydrochimique a montré une zonalité des concentrations d'éléments dosés ; en effet, le Sud de la plaine présente un état de vulnérabilité important et un niveau de risque à la pollution très élevé, ensuite c'est la zone centrale de la plaine qui doit être ciblée par une réglementation garantissant la protection des eaux souterraines en cet endroit.

Etude de la vulnérabilité et du risque de pollution.

Trois méthodes ont été adoptées pour la cartographie de la vulnérabilité à la pollution chimique de l'aquifère sableux de la plaine d'El Ma El Abiod, elles tiennent compte de plusieurs facteurs, tels que la lithologie, la piézométrie, l'hydrochimie. L'analyse des cartes obtenues a permis de distinguer trois zones de degré de vulnérabilité différent. Les zones de faible et moyenne vulnérabilité occupent respectivement 30 et 45% de la surface totale de la plaine, alors que les zones à forte vulnérabilité occupent 25% de la dite surface.

La méthode de cartographie du risque a permis de comparer les secteurs de la plaine entre eux et de les hiérarchiser selon le risque potentiel de pollution des eaux souterraines qu'ils représentent. Les cartes acquises et la méthode utilisée aident à la définition des zones prioritaires d'action et au dialogue entre acteurs en leur fournissant un document commun, pour un développement durable au niveau de la plaine d'El Ma El Abiod.

Les données utilisées offrent une couverture spatiale satisfaisante, et constituent une alternative intéressante aux démarches de diagnostic du risque de pollution des eaux souterraines. Il est ainsi possible d'identifier rapidement les zones d'action prioritaires où des études plus détaillées doivent être mises en œuvre en vue d'émettre des préconisations.

2. DU POINT DE VUE METHODOLOGIQUE

Dans cette Thèse, nous avons essayé de montrer que :

-La pollution des eaux des formations sableuses de la plaine d'El Ma El Abiod est due à leur position, qui est proche de la surface du sol et également aux activités anthropiques. Car ce sol ne peut assurer une éventuelle autoépuration satisfaisante.

-La nécessité d'une surveillance permanente de ces eaux, à travers des analyses hydrochimiques périodiques qui vont renseigner, non seulement, sur des informations sur l'origine des eaux, mais aussi sur l'état du réservoir et la qualité de ses eaux.

L'hydrogéologie moderne est devenue, il faut l'admettre, une science à vocation pluridisciplinaire dans laquelle la seule étude soit du magasin, soit de la solution, ne saurait suffire à la compréhension des phénomènes hydrogéologiques et environnementaux.

Nous espérons avoir contribué à la mise à jour de la situation environnementale (risques de pollution) à travers des données de terrain, d'hydrogéologie et d'hydrochimie.

3. RECOMMANDATIONS

Un certain nombre de recommandations peut être proposé, afin de stopper la dégradation de la qualité des eaux souterraines et de mettre en place un dispositif de surveillance, ainsi :

- Arrêter, immédiatement, les nouveaux creusements de puits dans les secteurs où la nappe miocène est très sollicitée, surtout au niveau de la partie NW, et modérer les pompages dans les puits déjà existants ;
- Installer un réseau de piézomètres, sans pompage, à travers la nappe pour contrôler la fluctuation du niveau piézométrique, pour pouvoir cueillir des informations, suivre les paramètres hydrodynamiques ainsi que la qualité des eaux souterraines. Ces puits témoins doivent être parfaits et les mesures à effectuer sont : la piézométrie, le coefficient d'emmagasinement et les traceurs de pollution (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Zn, Pb...etc.).
- Effectuer des enquêtes exhaustives chaque année pour estimer les superficies irriguées et les débits de pompage et établir des cartes de distribution spatiale des ces superficies et de ces débits. Ceci pourrait aider à exiger une autorisation pour tout nouveau futur creusement de puits et à regrouper éventuellement les agriculteurs sous forme de petites associations ayant chacune un ou deux puits pour une bonne gestion des ressources en eau ;
- Adopter de nouvelles techniques d'irrigation (le goutte à goutte par exemple) plus économiques de l'eau (pas de pertes par évaporation, fuites,...) que le système « gravitaire », le plus répandu dans la région
- Améliorer le réseau des observations météorologiques qui a un rôle primordial dans la région et installer des lysimètres pour étudier l'infiltration efficace, ainsi que les processus de migration des sels vers la nappe ;
- Raisonner les apports en engrais azotés pour éviter les sur-fertilisations qui sont très répandues dans la région ;
- Eviter de laisser les sols nus pendant plusieurs mois par l'étude de nouveaux plans d'assolement ;
- Maîtriser le stockage et l'utilisation des déjections animales ;
- Examiner les possibilités et les moyens de recharger la nappe en commençant par effectuer des études géologiques, géophysiques et hydrogéologiques plus détaillées de cet aquifère hétérogène. Cette recharge pourrait être effectuée soit à partir des eaux de l'oued E'Znad où celui d'El Goussa. Ces données vont servir à améliorer la modélisation hydrodynamique et hydro-dispersif très utile pour simuler de nouveaux scénarios d'exploitation et simuler la propagation des polluants vers la nappe à court et moyen terme.

BIBLIOGRAPHIE

ANONYME, (1973-1975) : Fiche technique des forages : M1, M2, M3, M4, M6, M8, M9, M10, et AT1.

ABU-JABER N. (1997): Geochemistry and pollution of shallow aquifers in the Mafraqa area, North Jordan. *Environmental Geology* 37 (1-2) January 1999.

AMRAOUI N. (1996) : Etude de l'infiltration dans les sols fins non saturés. Thèse de Doctorat. Nancy. Institut polytechnique de lorraine, Ecole nationale supérieure de géologie de Nancy. 325p.

ASTIER J.L. (1971) : La géophysique appliquée à l'Hydrogéologie. Masson et Cie. Edition, Paris 277p.

ALILAOUAR A. (1986) : Ressource en eau d'une région semi-aride d'Algérie. Plaine d'El Ma El Abiod. Hydrodynamique et hydrochimie Thèse Doc-Ing. Université Paul Sabatier Toulouse 204p

AHKOUK S. (2004) : Impact des fertilisants agricoles et du mode d'irrigation sur la qualité des eaux souterraines en zones irriguées sous climat semi-aride : cas de la plaine des Chtouka. Bassin du souss-Massa. Maroc Thèse doctorat. Université Ibnou Zohr Agadir 134p.

Aurousseau P., Bouedo T., Squidant H. et Quidu O. (1997) : Serveur html du Laboratoire de Spatialisation Numérique. <http://viviane.roazhon.inra.fr/spanum/index.htm>

BAKALOWICZ M. (1979) : Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Thèse d'état Université P. et M. Curie Paris VI.

BAALI F. LATRECHE Dj. (1994) : Approche hydrogéologique de la région d'El Ma El Abiod. Mémoire d'Ing. IST Université de Annaba 168p.

BRGM (2000) : Gestion des sites (potentiellement) pollués. Version 2. Edition BRGM

BRGM (2003) : Carte de vulnérabilité intrinsèque des nappes du département de l'Eure-et-Loir échelle (1/100 000). 13p.

BRGM, (1975-1979) : Cartes de vulnérabilité à la contamination des eaux souterraines (FF: 1/250 000). BRGM, Orléans.

BIGORRE F. (1998) : Estimation des propriétés de rétention en eau de sols forestiers : application aux sols de l'Est de la France. Compte rendu du 16^{ième} congrès mondial de science du sol. Montpellier. CD ROM

BOUTALEB S. (2000) : Impact de la géologie et du climat des bassins versants sur la qualité des eaux d'une grande nappe alluviale en climat semi-aride : application aux relations hydrogéologiques entre haut-atlas et la plaine de sousse. Thèse de doctorat Université Ibnou Zohr Agadir 164p.

BONNET M., LANDREAU A. (1979) : Mécanismes d'acquisition de la qualité chimique d'une eau souterraine. Orléans, rapp. Inédit n° 79SGN661HYD, 40 p

BEZELGUES S. (2002) : Cartographie de la vulnérabilité des nappes de grand-terre et de marie-Galante. (Guadeloupe) Rapport BRGM-51783-Fr, 41p.

B. Lumière et al. (2001) : Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes. Application dans un contexte d'évaluation détaillée des risques pour les ressources en eaux. Document du BRGM 300. Edition BRGM. France, 121p

BOUCHAOU L., CHAUVE P., MUDRY J., MANIA J., HSISSOU Y. (1997) : Structure et fonctionnement d'un hydrosystème karstique de montagne sous climat semi-aride : cas de l'atlas de béni Mellal (Maroc). Journal of african earth sciences, Vol. 26, n°2. pp225-236.

CHEVALLIER P. (1995) : Gestion de l'environnement en milieux urbain et industriel. Collection sciences de l'environnement. Québec. Université de Québec. 577p.

CASTANY G. (1963) : Traité pratique des eaux souterraines. Dunod Edit. Paris, 641p.

CASTANY G. et MARGAT (1977) : Dictionnaire français d'Hydrogéologie. Bur. Rech. Géol. Minière, 249p.

CASTANY G. (1968) : Prospection et exploitation des eaux souterraines. Ed. Dunod Paris France 683p

CASTANY G. (1982) : Principes et méthodes de l'Hydrogéologie. Dunod Edit. Paris, 334p.

C. Mignolet et al (1997) : Système d'élevage et risque de pollution azotée. Construction d'un indicateur de risque et application dans la plaine des Vosges. INRA Prod. Anim., 10(4), 275-285

COOTE D.R. GREGORICH (2000) : La santé der l'eau – Vers une agriculture durable au canada. Direction de l'agriculture et agroalimentaire Canada, Ottawa (Ontario).

CORPEN, (2003) : Des indicateurs pour des actions locales de maîtrise des pollutions de l'eau d'origine agricole : éléments méthodologiques. Applications aux produits phytosanitaires

CONDAPPA D. (2005) : Etude de l'écoulement à travers la zone non saturée des aquifères de socle à l'échelle spatiale du bassin versant. Application à l'évaluation de la recharge au sein du bassin versant de Maheshwaram, Inde. Thèse de doctorat. Université Joseph fourier. Pp27-66.

DJABRI L. (1987) : Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe alluviale de Tébessa «essai de modélisation » Thèse de Doc. Ing. Univers. Franche

DJABRI L. (1996) : Mécanismes de la pollution et vulnérabilité des eaux de la seybouze. Origines géologiques, industrielles, agricoles et urbaines. Thèse de Doctorat d'État. Université de Annaba 280p

DELMAS-GADRAS C. (2002) : Influence des conditions physico-chimiques sur la mobilité du plomb et de zinc dans un sol et un sédiment en domaine routier. Thèse de Doctorat. Université de pau et des pays de l'Adour pp25-80.

DEBIECHE T H. (2002) : Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Thèse de doctorat. Univ. De franche comté. 199p.

DUROZOY G. (1956) : Carte géologique au 1/50 000 de Tébessa feuille 206, et ça notice explicative.

DUCHAUFOR P. (1995) : Pédologie, sol, végétation, environnement (4^{ème} édition). Abrégés. Paris Masson 324p

DUCHAUFOR P. (2001) : Introduction à la science du sol, végétation, environnement. 6^e édition, Dunod, Paris, pp.286-294

DUBOIS DE LA SABLONIERE F. (1998) : Nitrates – origine et impact sur le milieu. Agriculture et environnement. Paris. SHF pp95-104

EL MESLOUHI et al (1994) : Elaboration de la vulnérabilité moyennant la méthode DRASTIC et le Système d'Information Géographique (SIG) (cas de la nappe de Souss-Chtouka) Guide book on Mapping Groundwater Vulnerability. Volume n° 16 Ed. de l'IAH, pp.94-99.

FAKIR Y. (1991) : Caractérisation hydrogéologique et hydrochimique des aquifères côtiers du Sahel de Safi à Oualidia (Méséta côtière, Maroc). Thèse Univ. Semlalia, Marrakech, Maroc. 188

FELLRATH M. (1995) : Qualité des eaux. Monographies en Ecologie des Polluants (2). Institut de Génie de l'Environnement, Laboratoire de Génie Sanitaire. Ecole Polytechnique Fédérale de LAUSANNE 220p

GILLI E., MANGAN CH., MUDRU J. (2004) : Hydrogéologie. Objets, méthodes, applications. Dunod, Paris, 303 p.

GRAMIP (2002) : Localisation des zones à risque vis-à-vis du transfert des substances phytosanitaires vers les eaux superficielles et souterraines en Midi-Pyrénées : Méthodologie de travail. 32p

GRILLOT J.C., RAZACK M. (1985) : Evolution spatio-temporelle d'un aquifère alluvial sous l'effet d'une sécheresse pluriannuelle exceptionnelle (littoral médit., Hérault, France), J. Hydrol., 82, 155-173.

GUEFAIFIA O. (1996) : Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe. Aquifère d'El Malabiod. Thèse de Magistère Univers. Annaba, 143p.

HSISSOU Youssef et al. (1995) : Caractérisation des eaux de l'aquifère turonien du bassin du Tadla (Maroc) par le rapport des concentrations molaires Sr^{2+}/Ca^{2+} . Journal of Hydrology 183. pp 445-451.

HSISSOU Y. (1999) : Impact de l'environnement naturel et anthropique sur la qualité des eaux alluviales en zone semi-aride : cas de la plaine du souss. Thèse d'état Es-Sciences Université Ibnou Zohr Agadir 228p.

HSISSOU Y., CHAUVE P., MANIA J., MANGIN A., BAKALOWICZ, GAIZ (1996) : Caractérisation des eaux de l'aquifère turonien du bassin du Tadla par le rapport des concentrations molaires Sr^{2+}/Ca^{2+} . J. Hydrolo. 183 : 445-451.

HSISSOU Y., MUDRY J., MANIA J., BOUCHAOU L., CHAUVE P. (1997) : Dynamique et salinité de la nappe côtière d'Agadir (Maroc), influence du biseau salé et des faciès évaporitiques. Fifth Scien. Ass. of IAHS, Rabat, Maroc, IAHS publi. n°244, 73-82.

HANI A. (1983) : Étude hydrogéologique des nappes aquifères des formations miocènes dans la région d'El Ma El Abiod. Mémoire d'Ing. Université d'Annaba pp 3-8

KHERICI N. (1985) Aquifère sableux de bords de mer. Hydrodynamique et hydrochimie exp. de la nappe de Bouteldja. NE Algérien. Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle USTL Montpellier France 202p

KHERICI N. (1993) : Vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines d'un système de nappes superposées en milieu industriel et agricole (Annaba – la Mafragh) NE de l'Algérie. Thèse de Doctorat Es-Sciences Université de Annaba 170p

KRIMISSA S. (2003) : Nappes superficielles en zone semi-aride : origine des eaux et de la salinité, renouvellement. Exp. Des nappes Massa et Souss Maroc. Thèse de doctorat. Université de Franche-comté France. 190p

LALLEMAND-BARRES A. (1995) : Méthodes de dépollution des eaux souterraines. Manuels et Méthodes. Orléans. BRGM. pp60102

LACROIX M. (1991) : Impact de l'irrigation sur un aquifère alluvial. Dynamique du système Basse Durance : nitrates et isotopes (cartographie), piézométrie (modélisation mathématique). Thèse Doct. Univ. 161 p.

LEVIEL B. (2000) : évaluation des risques et maîtrise des flux d'azote au niveau d'une parcelle agricole dans la plaine roumaine et bulgare. Application aux cultures de maïs, blé, colza et betterave. Institut polytechnique de Toulouse. 308p.

LAMBRAKIS N.J. (1997): The impact of human activities in the Malia costal area (Crete) on groundwater quality. Environmental Geology 36 (1-2) Nov

LECCOMTE P. (2000) : Les sites pollués, traitement des sols et des eaux souterraines. CNRCCP. Edition Lavoisier TEC.&DOC .194p

LOUHI A. (1996) : pollution des eaux et des sols. Cas de la région de Annaba, Etude des interférences et dosage de Al, Fe, Cu, Zn, Cr, Pb, Sn, et Hg par spectrométrie d'émission plasma-ARC (DCP-AES), absorption atomique (SAA) et spectrophotométrie UV/VIS. Thèse de Doctorat université de Annaba 167p.

MARTINRLLI I. (1999) : infiltration des eaux de ruissellement pluvial et transfert de polluants associés dans le sol, urbain. Vers une approche globale et pluridisciplinaire. Thèse de doctorat. INSA de Lyon

- MARGAT J. ROUX J.C. (1986):** Interaction des impacts des managements et des exploitations sur les eaux de surface et souterraines. Paris : SHF rapport n°14.
- MARJOUA A. (1995):** Approche géochimique et modélisation hydrodynamique de la Chaouia côtière (Maroc) : origines de la salinisation des eaux. Th. Doct. Univ. Paris 6, 179 p.
- MARSILY DE G. (1993):** Hydrogéologie : comprendre et estimer les écoulements souterrains et le transport des polluants, Paris ; Ecole des mines de Paris, 237p.
- MARSILY DE G. (1993) :** les différentes approches pour l'élaboration d'un modèle, Actes du séminaire Eaux environnement : Modélisation du comportement des polluants dans les hydrosystèmes, Paris ministère de l'environnement, pp 9-23.
- MARSILY DE G. (1981) :** Hydrogéologie quantitative. Ecole Nationale Sup. des mines de Paris, Masson Edition, 219 pages
- MARSILY DE G. (2004) :** Cours d'hydrogéologie. Université Pierre & Marie Curie. 226p.
- MARIOTTI A. (1998) :** Nitrates un polluant de longue durée. Pour la science, 249 : 60-65.
- MARIOTTI A. (1999) :** Dénitrification in situ dans les eaux souterraines, processus naturels provoqués. Revue. Hydrogéologie, n°3, 1994, p43-68
- MARTIN C. (2003) :** Mécanismes hydrogéologiques et hydrochimiques impliqués dans les variations saisonnières des teneurs en nitrates dans les bassins versants agricoles. Approche expérimentale et modélisation. Thèse de doctorat. Université de Rennes 1. 254p
- MANIA J., IMERZOUKENE S., BRAILLON J.M. (1985) :** Pollution saline de la nappe côtière à l'est d'Alger, J. Hydrol., 3, 213-226.
- MACARY F., VERNIER F., LALANNE J., LUCAS G., RIGOLOS O. (2005) :** Indicateurs environnementaux pour le zonage de risque potentiel de transferts de pesticides à l'échelle de bassin versant : méthodologies pour un changement d'échelle. Colloque GFP, mai 2005, Marne-la-vallée, 8p
- PACHECO A. J. and CABRERA A. S. (1997):** Groundwater Contamination by Nitrates in the Yucatan Peninsula. Hydrogeol. J., v. 5, no. 2, pp. 47-53.
- PAGOTTO CH. LEGRET M. (1998) :** Une tentative de modélisation des charges de pollution des eaux de ruissellement sur chaussée autoroutière. Acte de la 3^{ième} conférence internationale sur les nouvelles technologies en assainissement pluvial Novatech'98. vol.1 pp 47-558
- PAGOTTO C. (1999) :** Etude sur l'émission et le transfert dans les eaux et les sols des éléments traces métalliques et des hydrocarbures en domaine routier. Thèse de Doctorat, Université de Poitiers 252p.
- ROUABHIA Aek et BOUDOUKHA A (1996) :** Essai de synthèse sur l'hydrogéologie karstique du plateau de Chéria exp. du forage JK8. Séminaire national des sciences de la terre INH Boumerdes 10p

ROUABHIA Aek (1996) : Étude de la relation lac nappe à partir des données Youssef piézométriques et hydrochimiques cas du lac Fetzara NE Algérie. Séminaire national des sciences de la terre INH Boumerdes 12p.

ROUABHIA Aek (2001) : Vulnérabilité à la pollution chimique d'un système aquifère en région semi-aride d'Algérie. Cas de la plaine d'El Ma El Abiod. Mémoire de magister. Université de annaba. 120p.

ROUABHIA Aek, BAALI F., KHERICI N., DJABRI L. (2004) : Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El MA EL Abiod (Algérie) revue Sécheresse n°4, Vol.15

ROUABHIA Aek, BAALI F., KHERICI N., DJABRI L. (2004) : Vulnérabilité et impacts des activités anthropiques sur les eaux souterraines de la région d'El MA EL Abiod. Revue vecteur environnement, Vol.37, N°3

RODIER J. (1996) : L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 8^e édition Dunod, Paris.

RICHARD L. (2000) ; Sur l'origine des ions chlorures dans les eaux salines des massifs granitiques CR Acad. Sc. Paris 331 : 783-788.

SCHOELLER H. (1962) : Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources Masson et Cie. Editions, 642 pages.

SIMMERS I. (1997): Recharge of Phreatic Aquifers in (Semi-) Arid Areas. Intern. Ass. Hydrogeol., 19, F 7918, 255 p.

SCHOELLER H. (1962) : Les eaux souterraines. Masson, Paris, 642p.

S. Cornas (2002) : Guide pratique de l'échantillonnage des eaux souterraines. Société suisse d'hydrogéologie. 80 p

TODD K. (1980): Groundwater hydrology. Seconde Edition. New York, J.Wiley & Sons, 510 pages

TARDAT-HENRY M. (1984) : Chimies des eaux. Editions le griffon d'argile inc. 338p.

U.N.E.S.C.O. (1987): Groundwater problems in coastal areas. 582 p.

YOUNSI A. (1994) : Etude des mécanismes des intrusions marines vers le système aquifère compris entre oued Oum-er-Rbia et Bir Jdid. Th. 3^o cycle Univ. El Jadida, 149 p.

YOUNSI A. (2001) : Méthodologie de mise en évidence des mécanismes de salures des eaux souterraines côtières en zone semi-aride irriguée. Chaouia côtière, Maroc. Thèse de doctorat d'état. Univ. Chouaib Doukkali. El Jadida Maroc. Pp. 18-30

Walter, C., Bouedo, T. et Aourousseau, P. (1996) : Cartographie communale des teneurs en matière organique des sols bretons et analyse de leur évolution temporelle de 1980 à 1995. Rapport final de la convention d'étude entre le Conseil Régional de Bretagne, l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne et l'ENSAR. 30p. 6 cartes.

ANNEXES

A- Production scientifique : (2001-2004)

1. Revues Internationales

1- ROUABHIA Abdelkader, BAALI F., KHERICI N., DJABRI L. (2004) : Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El MA EL Abiod (Algérie). *Revue Sécheresse* n°4, Vol.15

2- ROUABHIA Abdelkader, BAALI F., KHERICI N., DJABRI L. (2004) : Vulnérabilité et impacts des activités anthropiques sur les eaux souterraines de la région d'El MA EL Abiod. *Revue vecteur environnement*, Vol.37, N°3

Colloques

a)- Internationaux

1- ROUABHIA A. kader, BAALI F., KHERICI N., DJABRI L, (10-13 Oct. 2002): Vulnérabilité et risqué de pollution d'un système aquifère, en région semi-aride de l'Algérie. Cas de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El MA EL Abiod. *International workshop on water in the mediterranean bassin : Ressource and sustainable development. Watmed 1. Monastir, Tunisia.*

2- ROUABHIA A. kader, BAALI F., KHERICI N., DJABRI L, (2003): Risque de pollution du système aquifère de la plaine d'El Ma El Abiod. Nord-Est Algérien. *Symposium International de l'eau. Palais des festivals de cannes du 23 au 27 juin 2003. Cannes, France.*

3- ROUABHIA A.kader, BAALI F., KHERICI N., DJABRI L, (2004) : Hydrogéologie et hydrochimie de la région karstique de Chérie. N.E Algérien. *Colloque international Terre-Eau (4 au 6 décembre2004) Université de Annaba. Algérie*

4- A. ROUABHIA, F. BAALI, L. DJABRI, A. HANI & J. MANIA (2003). Vulnérabilité et risque de pollution de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma El Abiod (extrême Est de l'Algérie). *Symposium International «Hydrologie des régions méditerranéennes et semi arides », Avril 2003, Montpellier. Poster accepté.*

5- L. DJABRI, A. HANI, J. MANIA, A.ROUABHIA, F. BAALI & R. DJAFFER (2003). Impact du complexe sidérurgique d'El-Hadjar sur la qualité des eaux de l'oued Meboudja. *Symposium International «Hydrologie des régions méditerranéennes et semi arides», Avril 2003, Montpellier. Poster accepté.*

6- L. DJABRI, A. HANI, A. ROUABHIA & BAALI (2002). Etude de La salinité des eaux par la méthode de Stuyfzand: Application aux eaux souterraines de l'extrême Est algérien, 19^{ème} Colloque de Géologie Africaine, Mars 2002, El Jadida (Maroc), p. 63.

b)- Nationaux

1- ROUABHIA A. kader, BAALI F., KHERICI N., (2001) : Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines de la plaine de «la Merdja » Tébessa. 3^{ième}. *Congrès Algérien de Génie des Procédés. ANDRU Université de Ouargla*

2- ROUABHIA A. kader, BAALI F., KHERICI N. (2002): Hydrogéologie et pollution de l'environnement hydrique du système aquifère de la région de Chéria. *2^{ème} séminaire sur les ressources en eau. Centre universitaire Mustapha stanbouli de Mascara. Mascara le 21/22 avril 2002.*

3- ROUABHIA A. kader, KHERICI N., BAALI F., DJABRI L. (2004) : La vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines. Application de trois méthodes de cartographie. Exp. de la plaine d'El Ma El Abiod. *Premier séminaire national sur les sciences de la terre au service du développement durable. Université de Tébessa 26 et 27 avril 2004.*

4- ROUABHIA A. kader, KHERICI N., BAALI F., DJABRI L. (2003) : Hydrogéologie et ressources hydriques de Tébessa (plaines de la merdja, d'El MaEl Abiod et de Chéria. *Journées nationales sur la géologie algérienne : Etat actuel de la recherche géologique en algérie. Oran 14 et 15 décembre 2003.*

LA CARTOGRAPHIE

Nature et implantation de l'information

Les isolignes sont des lignes d'égale valeur numérique d'une donnée, (isotherme : lignes d'égale valeur de température, les isohypses : lignes d'égale altitude, isopièze : ligne d'égale profondeur du plan d'eau, etc...). Elles permettent de donner une expression zonale à une information de nature ponctuelle : par exemple le lecteur comprend aisément que dans l'espace compris entre l'isoligne de 10° et celle de 20°, il existe toutes les valeurs intermédiaires.

Construction de la carte

Quelle que soit la nature des données, la méthodes d'élaboration de la carte est identique à partir du moment où l'on travail sur des points cotés. Ces points, aussi denses que possible de manière à accroître la précision de la représentation, sont placés sur le support avec leur cote. Puis, on les relie par des segments de droites de telle sorte que les liaisons soient aussi courtes que possible (on privilège donc les relation de proche en proche). On veille en outre à ce qu'il n'y ait aucune intersection entre les segment en dehors des points cotés, ce qui rendrait la suite des opérations impossible. (fig.A2)

Après avoir choisi une équidistance convenable entre les futures isolignes, de telle sorte qu'il n'y ait pas plus d'une dizaine de valeurs sur la carte, on détermine le passage de celles-ci par les segments de la façon suivante, en supposant la variation du phénomène continue et homogène.

On applique la formule $l = \frac{L.d}{D}$ (fig. A1)

Où :

- l : distance entre l'un des points cotés et le point de passage de l'isoligne (OB ou OA) en millimètres.
- L : longueur totale du segment AB en millimètres,
- d : différence de valeur entre O et A ou entre O et B

Exemple : si L = 18mm, A = 1040 et B= 1050, et on cherche à faire passer l'isoligne ; 1045.

Par suite,

$$l = \frac{18.(1050 - 1045)}{1050 - 1040} = 09mm$$

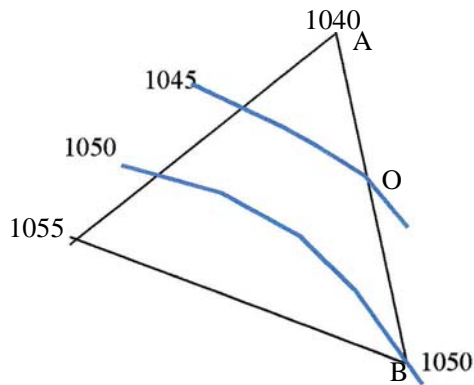
On peut, soit suivre une même isoligne sur l'ensemble de son (ou ses) parcours sur la carte, soit procéder segment par segment, en pointant toutes les isolignes susceptible d'y passer. De toute manière, on termine l'opération en reliant tous les points de mme valeur par des droites. On peut enfin lisser les isolignes en transformant les lignes brisées en courbes.

Il faut seulement, faire attention aux erreurs de positionnement, sachant notamment qu'une même isoligne ne peut passer qu'une seule fois par le même segment.

Les isolignes ne peuvent adopter que deux modalités d'implantation, la traversée de par en part de la zone cartographiée ou la courbe fermée autour d'un ou plusieurs points cotés.

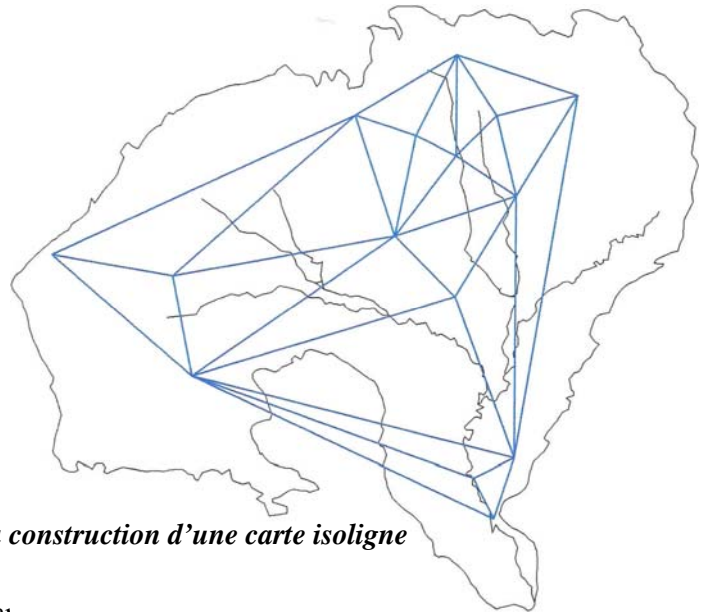
Choix du fond de la carte

Le fond peut être très limité sur une carte isoligne, dans la mesure où l'élément essentiel est constitué par les points cotés. C'est ainsi que, dans l'hypothèse d'une représentation de données zonales transformées en données ponctuelles on renoncera à reporter les limites de terrain (communales en l'occurrence) devenues en fait inutiles, voire gênantes, dans la mesure où le but recherché consiste précisément à s'en affranchir.



l : AO ou OB.
 L : AB (distance entre A et B)
 d : différence de valeur entre 0 et A ou entre 0 et B.
 D : différence de valeur entre A et B.

A1- Triangulation pour la construction d'une carte isolignes



Modalités de réalisation

A2- La construction d'une carte isoligne

Deux options se présentent à cet égard .

- on ne figure que les isolignes : dans ce cas, les courbes sont référencées par l'indiction de la valeur, à leur extrémités et, s'il y a lieu, le long de leur parcours (comme les courbes de niveau maîtresses sur les carte topographiques)
- on complète le report des isolignes par des plages d'intensités ordonnées entre celle-ci, comme pour les représentations des catégories de données numériques en valeurs relatives. Il est alors inutile de référencer les courbes elles-mêmes puisque la légende comportera des cartouches avec l'indiction des classes ainsi définies. Par contre, la mention des points cotés demeure obligatoire dans les deux cas.

Nomenclature et légende

L'absence de fond de carte administratif et la simplicité du fond physique, quelle que soit l'option choisie, nécessitent en principe le report exhaustif des points cotés avec leur valeur et la toponymie qui s'y rattache (exemple: P12: 1025m). Cependant, si le réseau des points est trop dense, on se limitera à une partie d'entre eux.

La légende sera très simple dans l'option a) : un tronçon d'isoligne (fermé ou non) avec sa valeur et l'indication d'un point coté. Dans l'option b), il convient de figurer dans des cartouches l'échelonnement des valeurs zonales inter isolignes et les limites de classes obtenues, qui seront par définition- équidistantes. On reportera là aussi l'indication d'un point coté

Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma El Abiod (Algérie)

Abdelkader Rouabhia¹
Fethi Baali¹
Nacer Kherici²
Larbi Djabri³

¹ Université de Tébessa,
BP 34-A Nahda-Poste,
12004 Tébessa
Algérie

<rouabhia22@yahoo.fr>

² Université d'Annaba,

BP 12,
Annaba 23000

Algérie

<prnkherici@hotmail.com>

³ Université d'Annaba,

11, rue Assla Hocine,
Annaba 23000

Algérie

<djabri_larbi@yahoo.fr>

Résumé

La présente étude traite de la vulnérabilité et des risques de pollution de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma El Abiod (Algérie), menacée par de nombreux foyers de pollution (urbanisations, industrie, élevages, décharges sauvages, etc.), qui se sont multipliés dans la région en dehors de toute mesure de protection de l'environnement, et en particulier des ressources en eau. Celles-ci sont exposées à des risques potentiels d'altération continue ou épisodique, et seront menacées davantage dans l'avenir par l'insuffisance des volumes de recharge (climat semi-aride et leur surexploitation). La méthode utilisée pour entreprendre cette étude repose sur le recensement des causes de pollutions potentielles ou réelles en tenant compte de plusieurs facteurs, tels que la lithologie, la piézométrie, l'hydrochimie et les indices de contamination. L'analyse de la carte de vulnérabilité a permis de distinguer trois zones de degrés de vulnérabilité différents. Les zones de faible et de moyenne vulnérabilité occupent respectivement 30 et 45 % de la surface totale de la plaine, alors que les zones à forte vulnérabilité occupent 25 % de cette surface totale.

Mots clés : Eau souterraine, Pollution, Facteur anthropique, Algérie.

Summary

Groundwater vulnerability and pollution risks of the miocen sandstone aquifer in the El Ma El Abiod plain (Algeria)

The El Ma El Abiod plain aquifer has been threatened by numerous pollution sources that have increasingly proliferated in the area due to a lack of environmental protection measures, especially for water resources. As the groundwater is exposed to potential risks of continuous or episodic deterioration, the establishment of groundwater vulnerability mapping provides, among other things, an effective tool for attaining this objective. The method that was adopted to assess groundwater vulnerability is simple and based on some parameters: depth to groundwater, aquifer media, soil media, hydraulic conductivity of the aquifer and contamination index. The analysis of the El Ma El Abiod groundwater vulnerability map prepared using a combination of parameters has made it possible to distinguish three zones of differing vulnerability degrees: important, average and weak. The El Ma El Abiod plain houses an aquifer badly protected from surface pollution. The average vulnerability zone is actually the part of the Miocene layer which constitutes the water reservoir of the region. The two important vulnerability zones, which are inside the area, must be protected by regulations.

Key words: Underground Water, Pollution, Anthropic Factor, Algeria.

En Algérie, la nouvelle politique instaurée récemment vise à protéger et à sauvegarder les ressources en eaux dans leurs gisements, avant qu'elles ne soient contaminées. En effet, les techniques de décontamination des nappes polluées sont longues, coûteuses et ne permettent pas de restaurer la potabilité des eaux [1].

La plaine d'El Ma El Abiod, à vocation essentiellement agricole, a connu, il y a une dizaine d'années, un développement industriel important, avec pour conséquences des rejets abondants non traités dans le milieu physique. Aussi, dans un avenir proche, il est à craindre que la qualité des eaux souterraines ne soit plus aux normes de potabilité pour l'alimentation humaine mais également pour beaucoup d'autres utilisations [2]. L'étude réalisée ici vise à localiser sur une carte les zones vulnérables et à faire l'inventaire des causes de pollution réelles ou potentielles d'origine naturelle et anthropique.

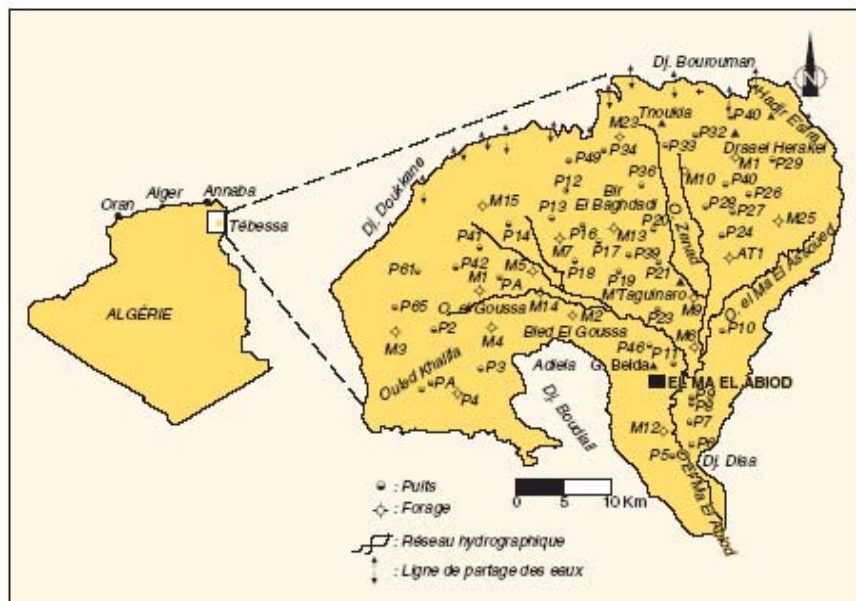


Figure 1. Carte de situation géographique et position des points d'eau.

Région d'étude et méthodologie

Présentation de la région d'étude

El Ma El Abiod est une plaine de 420 km², située au sud-est de la ville de Tébessa, au nord-est de l'Algérie. Elle fait partie du bassin-versant du chott Melhir (figure 1). Elle se trouve au centre d'un synclorium limité par l'anticlinal de Tnoukla et Bouroumane, au nord, qui constitue la limite entre deux grands bassins-versants – celui de la Medjerda qui s'écoule vers le nord et celui de l'oued Melhir qui s'écoule vers le sud, et par l'anticlinal de Boudjal et E'Dlaa, au sud. La topographie est presque régulière, la plaine est légèrement inclinée vers le sud. La région est soumise à un climat semi-aride. La moyenne annuelle des précipitations est de l'ordre de 220 mm, tandis que l'évapotranspiration réelle, estimée à partir du bilan de Thornthwaite, et l'infiltration, y sont respectivement de 210 et 10 mm/an. La prospection dans la région a commencé dans les années 1970 avec la réalisation d'une prospection géophysique et de plusieurs forages profonds. Il s'agit d'un haut plateau, où on distingue deux grands ensembles géologiques : les affleurements de bordure d'âge Crétacé et les formations d'âges Miocène et Quaternaire. Les premiers constituent les zones d'alimentation de la nappe contenue dans le second ensemble formé de sables et de grès. L'épaisseur des formations aquifères varie d'est en ouest de 20 à 200 m (figure 2) avec des transmissivités oscillants entre 10⁻³ et 10⁻² m²/s.

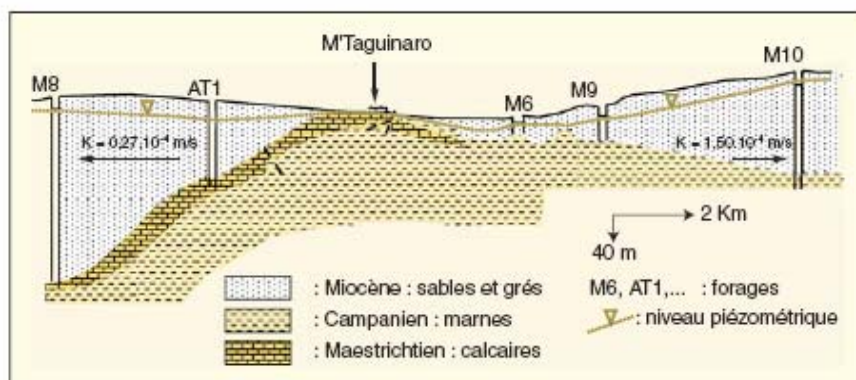


Figure 2. Coupe hydrogéologique.

Méthodologie et conditions analytiques

Sur un ensemble de deux cent points d'échantillonnage, nous avons dosé les chromates avec une méthode colorimétrique spectrophotométrique : DR-2 HACH. Les nitrates ont été dosés avec réduction au cadmium au moyen du NITRAVER V où la précision est de 0,8 mg/LN-NO₃⁻ pour les fortes concentrations. Pour les faibles teneurs, la réduction est faite au NITRAVER VI : la lecture s'est faite à 500 nm et la précision de mesure est de 0,010 mg/LN-NO₃⁻.

Étude de la vulnérabilité du système à la pollution

La pollution des eaux souterraines de la région d'El Ma El Abiod est d'origine

essentiellement anthropique, industrielle, agricole et domestique.

Pollution d'origine industrielle

Au cours de la dernière décennie, la région a connu un développement industriel important (figure 3) et la pollution industrielle est provoquée par les rejets thermiques, chimiques et organiques par voies terrestres ou atmosphériques. Les unités industrielles qui sont des points potentiels ou réels de pollution peuvent être encore inventoriées. Étant donné la faiblesse de la profondeur du niveau piézométrique et la perméabilité élevée des sables, l'industrie constitue un foyer certain de dégradation de la qualité des eaux souterraines.

gée contre la pollution originaire de la surface. Dans cette étude, une carte de vulnérabilité a été mise au point grâce aux analyses physico-chimiques réalisées sur près d'une centaine de points avec le calcul d'un indice de contamination, et un suivi de la profondeur du plan d'eau de la nappe. Cette carte met en évidence trois zones de différents degrés de pollution. La forte vulnérabilité est observée en aval des écoulements, ainsi qu'au niveau central, confirmant l'impact de l'industrie et de l'agriculture en cet endroit, où la perméabilité est importante. Cette zone doit faire l'objet d'une réglementation de protection. ■

Remerciements

Les auteurs remercient le Professeur Messadi, directeur du Laboratoire pollution des eaux de l'université d'Annaba et le Professeur Jacky Mania de l'École universitaire de Lille (Eudil), France.

Références

1. Albinet M, et al. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraines. *Bull BRGM (2) 1970 ; Section III (4) : 13-22.*

2. Rouabhia A. *Vulnérabilité des eaux souterraines d'une région semi-aride d'Algérie. Cas de la plaine d'El Ma El Abiod.* Thèse de magister, université d'Annaba, 2001, 150 p.

3. Djabri L. *Mécanisme de la pollution et vulnérabilité des eaux de la Sybouse. Origines géologiques, industrielles, agricoles et urbaines.* Thèse de doctorat d'État, université d'Annaba, 1996 : 128-32.

4. Baali F, Latreche DJ. *Approche hydrogéologique de la région d'El Ma El Abiod.* Mémoire d'ingénieur de l'Institut des sciences de la terre (IST), université d'Annaba, 1994, 168 p.

5. Kherici N. *Vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la plaine de Annaba-La Mafragh, Algérie.* Thèse de docteur-ès-sciences, université d'Annaba, 1993 : 120-5.



Année : 2006

Nom de l'auteur: **ROUABHIA Abdelkader**

D.L.N : 01.02.198 à Sidi Bel Abbès Algérie

Fonction : Enseignant Chercheur (Université de Tébessa)

Université: Université Badji Mokhtar de Annaba

Rouabhia22@yahoo.fr

Titre de la Thèse:

Vulnérabilité et risques de pollutions des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma El Abiod. N.E. Algerien.

Cette thèse a pour cadre une région à climat semi-aride. Elle s'intéresse à la vulnérabilité et au risque de pollution chimique de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma EL Abiod, où l'on constate une dégradation progressive de la qualité des eaux souterraines.

A travers cette thèse, une discussion descriptive sur l'alimentation de l'aquifère, la circulation de l'eau, l'évolution de son chimisme, l'influence des conditions climatiques et hydrogéologiques a été engagée dans le but de proposer une cartographie de la vulnérabilité et du risque de pollution chimique d'un réservoir souterrain, qui constitue un véritable château d'eau pour la région d'El Ma El Abiod.

Cette thèse s'organise en sept chapitres.

La situation géographique, le milieu naturel et la géologie de la région ont été présentés dans les deux premiers chapitres, où nous avons essayé de montrer les différentes phases lithologiques, paléogéographiques et tectoniques liées à l'histoire géologique de la région, ainsi que les contraintes que subit un aquifère composé de sable et de grès d'âge miocène, limité entre deux accidents tectoniques qui contribuent à son alimentation.

Le troisième chapitre a été consacré à la climatologie de la région, malgré le manque de données en absence de stations fonctionnelles. Plusieurs calculs abordés pour la mise au point d'un bilan négatif qui ne permet pas une recharge satisfaisante de l'aquifère en question.

Le quatrième chapitre est relatif à l'analyse hydrodynamique de l'aquifère, basée sur l'étude de la circulation de l'eau, de son origine, son évolution dans le temps et dans l'espace

Il a fait aussi l'objet d'une étude expérimentale et d'une enquête exhaustive de terrain, afin d'estimer l'infiltration à partir de la surface du sol, paramètre non connu auparavant, ainsi que les retours vers la nappe après irrigation. Ces connaissances permettront de dégager les solutions à préconiser pour la préservation du système aquifère de la plaine.

Le cinquième chapitre a été consacré à une cartographie hydrochimique permettant de voir la répartition des faciès et des éléments indicateurs de pollution et de salinisation, à savoir les chlorures, les sulfates, les nutriments, le plomb, le zinc et le strontium. Ce chapitre a permis aussi la détermination des apports vers la nappe, et a révélé la dégradation de la qualité des eaux destinées à l'irrigation.

Le sixième chapitre présente le résultat de l'application de trois méthodes de cartographie de la vulnérabilité, largement expliquées dans la bibliographie et appliquées dans le monde et en Algérie, à savoir la méthode DRASTIC, la méthode du BRGM et celle des indices de contamination. Elles ont donné presque le même résultat, vu les paramètres en commun.

Le septième chapitre propose une définition de la notion du risque et des indicateurs de pollution qui permettent l'établissement d'une carte de risque, elle a permis aussi une alternative intéressante aux démarches de diagnostic du risque de pollution des eaux souterraines de la région d'El Ma El Abiod.