

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**UNIVERSITE KASDI MERBAH
OUARGLA**

N° D'ordre :

N° de série :

**FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
ET SCIENCES DE LA MATIERE**

Département d'hydraulique et de génie civil

Mémoire

En vue d'obtention de diplôme de Magister en Hydraulique

Option : Aménagement hydraulique en zones arides

Réalisé par :

M^r: AZLAOUI MOHAMED

THEME

**Contribution à l'étude hydrogéologique et modélisation
du synclinal d'AIN BEL Wilaya DE DJELFA**

Devant le jury :

Président	KRIKER Abdel Ouahed	professeur	Univ. Ouargla
Examineur	NEZLI Imad Eddine	Maître de conférences MCA	Univ. Ouargla
Examineur	HACINI Messaoud	Maître de conférences MCA	Univ. Ouargla
Rapporteur	BOUTOUTAOU Djamel	Maître de conférences MCA	Univ. Ouargla
Invité	LOUCIF Djamel	Chef service ANRH	Djelfa



﴿ 67 ﴾ أَفَرَأَيْتُمُ الْمَاءَ الَّذِي تَشْرَبُونَ ﴿ 68 ﴾ أَأَنْتُمْ أَنْزَلْتُمُوهُ مِنَ السَّمَاءِ أَمْ نَحْنُ الْمُنزِلُونَ ﴿ 69 ﴾

لَوْ نَشَاءُ جَعَلْنَاهُ أُحْجَابًا فَلَوْلَا تَشْكُرُونَ ﴿ 70 ﴾

- صدق الله العظيم -

DÉDICACE

Au Nom d'ALLAH tout puissant, qui nous a éclairé les chemins du savoir et de la Sagesse, je dédie ce travail;

*A tous ceux que je porte dans mon coeur
Je dédie ce mémoire;*

*Je dédie surtout a ma regrettée mère : Baidlkoul Zaineb qui m'a toujours soutenu
le présente Mémoire, et ce a titre posthume ;*

*Je dédie ce modeste travail à mon cher père Mr :
AZLAOUI ALI*

A mes sœurs et frères, pour leur soutien et encouragements ;

Je remercie fortement mon frère AHMED, pour son aide

A tous mes amis et collègues avec amour et attention durant toute notre existence;

AZLAOUI

«La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi. Ici, nous avons réuni théorie et pratique : Rien ne fonctionne... et personne ne sait pourquoi !»

[Albert Einstein]

REMERCIEMENT

Au terme de ce modeste travail, je tiens à remercier mon promoteur monsieur BOUTOUTAOU Djamel pour son aide appréciable, sa disponibilité, et ses conseils fructueux qui m'ont facilité la réalisation de ce travail.

Mes vifs remerciements et mes respects les plus distingués vont à Monsieur KRIKER Abdel Ouahed, Professeur à l'université d'Ouargla pour avoir accepté de juger ce travail et me faire l'honneur de présider mon Jury de mémoire.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur HACINI Messaoud, Maître de conférences à l'université d'Ouargla, pour avoir accepté d'examiner mon travail et de faire partie du Jury de ce mémoire.

Mes vifs remerciements vont également à Monsieur NEZLI Imad Eddine, Maître de conférences à l'université d'Ouargla, pour son soutien et ses encouragements. Je le remercie également d'avoir accepté de juger ce travail et de faire partie du Jury de ce mémoire.

J'adresse mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance à Mme YOUNSI Djihad, chef service ANRH Djelfa

Puis, je remercie particulièrement Mr : MERZOUGI Brahim, qui m'a aidé à comprendre et utilisé le logiciel modflow.

Mes remerciements vont également à tous qui ont participé de loin ou de près pour que j'arrive à cette merveilleuse instant à savoir: tous mes enseignants, mes collègues de promo et Mrs : HAMIDI Mustapha, NAFSI Mohamed Salah, CHEBIHI Lakdar, ABIDI Saad Nouh etc....

MOHAMED.

الملخص

لقد عانت منطقة الجلفة لمدة طويلة من نقص الموارد المائية المخصصة للشرب و الزراعة والصناعة، حل هذا المشكل يعتمد على:
المساهمة في الدراسة الهيدروجيولوجية والنمذجة لطيه المقعرة عين البيل
هذه الدراسة تنطوي على النمذجة الهيدروديناميكية باستخدام برنامج **PROCESSING MODFLOW** لتمثيل ديناميكية الجيب المائي للأراضي الحديثة والمحاكاة العددية والقطعية ثنائية الأبعاد في الحالة المستقرة والعبارة حيث قدمت النتائج الرئيسية لهذا العمل على أفصل السيناريوهات والتوقعات مشيرا الى أن الخزان المائي الجوفي هو في حالة تندر بالخطر وبالتالي الحاجة إلى التدبير الكامل للموارد المائية في هذا الجيب المائي جد مهمة لضمان تنمية مستدامة
كلمات رئيسية: الجيب المائي ، المناطق الجافة ، النمذجة ، مقعرة

Résumé

La région de Djelfa souffre depuis longtemps de manque de la ressource, en eau pour l A E P L'agriculture et l'industrie, la résolution de ce problème se base sur :
La contribution a l étude hydrogéologique et modélisation du synclinal d'AIN BEL
Cette étude, consiste à la modélisation hydrodynamique à l'aide du logiciel PROCESSING MODFLOW, permettant d'atteindre une simulation numérique déterministe et bidimensionnelle, en régime permanent et transitoire. Les principaux résultats de ces travaux ont permis de mieux visionner différents scénarios et des prédictions ont été conclues, soulignant que cette nappe est dans un état inquiétant, d'où la nécessité d'entreprendre une gestion intégrée des ressources en eau dans cette nappe, afin de garantir un développement durable.

Mots clés: nappes, zone aride, modélisation, synclinal

ABSTRACT

Djelfa region has long suffered from lack of resources, water for AEP, Agriculture and industry to solve this problem:

At contribution hydrogeological study and modeling of the syncline AIN BEL
This study, involves the hydrodynamic modeling of using the software PROCESSING MODFLOW software, to achieve a numerical simulation deterministic and two-dimensional, steady state and transient. The main results of this work have provided a better view different scenarios and predictions have been concluded, stressing that This web is in alarming state, hence the need to undertake integrated management of water resources in this groundwater to ensure sustainable development.

Keywords: groundwater, arid, modeling, syncline

الملخص

لقد عانت منطقة الجلفة لمدة طويلة من نقص الموارد المائية المخصصة للشرب و الزراعة والصناعة، حل هذا المشكل يعتمد على:
المساهمة في الدراسة الهيدروجيولوجية والنمذجة لطيه المقعرة عين البيل
هذه الدراسة تنطوي على النمذجة الهيدروديناميكية باستخدام برنامج **PROCESSING MODFLOW** لتمثيل ديناميكية الجيب المائي للأراضي الحديثة والمحاكاة العددية والقطعية ثنائية الأبعاد في الحالة المستقرة والعبارة حيث قدمت النتائج الرئيسية لهذا العمل على أفصل السيناريوهات والتوقعات مشيرا الى أن الخزان المائي الجوفي هو في حالة تندر بالخطر وبالتالي الحاجة إلى التدبير الكامل للموارد المائية في هذا الجيب المائي جد مهمة لضمان تنمية مستدامة
كلمات رئيسية: الجيب المائي ، المناطق الجافة ، النمذجة ، مقعرة

Résumé

La région de Djelfa souffre depuis longtemps de manque de la ressource, en eau pour l A E P L'agriculture et l'industrie, la résolution de ce problème se base sur :
La contribution a l'étude hydrogéologique et modélisation du synclinal d'AIN BEL
Cette étude, consiste à la modélisation hydrodynamique à l'aide du logiciel PROCESSING MODFLOW, permettant d'atteindre une simulation numérique déterministe et bidimensionnelle, en régime permanent et transitoire. Les principaux résultats de ces travaux ont permis de mieux visionner différents scénarios et des prédictions ont été conclues, soulignant que cette nappe est dans un état inquiétant, d'où la nécessité d'entreprendre une gestion intégrée des ressources en eau dans cette nappe, afin de garantir un développement durable.

Mots clés: nappes, zone aride, modélisation, synclinal

ABSTRACT

Djelfa region has long suffered from lack of resources, water for AEP, Agriculture and industry to solve this problem:

At contribution hydrogeological study and modeling of the syncline AIN BEL
This study, involves the hydrodynamic modeling of using the software PROCESSING MODFLOW software, to achieve a numerical simulation deterministic and two-dimensional, steady state and transient. The main results of this work have provided a better view different scenarios and predictions have been concluded, stressing that This web is in alarming state, hence the need to undertake integrated management of water resources in this groundwater to ensure sustainable development.

Keywords: groundwater, arid, modeling, syncline

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Répartition et position des stations météorologiques.....	08
Tableau I.2: Répartition des pluies moyenne mensuelle des deux stations pluviométrique période 1969-2007	10
Tableau I.3: Pluies moyennes annuelles 1969-2007	11
Tableau I.4: Températures moyennes mensuelles de Djelfa 1986-2006.....	11
Tableau I.5: ETP moyennes mensuelles et annuelles calculées par la formule de THORNTHWAITE à la station de Djelfa (1986-2006).....	17
Tableau I.6: ETP moyennes mensuelles et annuelles calculées par la formule de SERRA à la station de Djelfa (1986-2006).....	18
Tableau III.1: Inventaire des forages (synclinal d'Ain el Ibel)	44
Tableau III.2 : Localisation des points de mesure piézométrique	51
Tableau III.3: Résultat des essais de débit	58
Tableau IV.1 : Inventaire des forages (Ain EL Ibel-Sidi Makhoulf)	88
Tableau IV.2 : Localisation points de contrôle	95
Tableau IV.3 : Bilan hydraulique calculé dans le cas du régime Permanent établi pour l'année 2002	99
Tableau IV.4 : Bilan hydraulique calculé dans le cas du régime Transitoire établi pour l'année 2010	112
Tableau V.1: Composantes des scénarios simulent	116
Tableau V.2: Inventaire des forages du FNDRA synclinal d'Ain el Ibel	117
Tableau V.3: Inventaire des forages du FNDRA synclinal d'Ain el Ibel.....	118
Tableau V.4: Localisation des points d'observation.....	120

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Carte de situation de la zone d'étude	05
Figure I.2 : Carte des bassins versants	06
Figure I.1 : Répartition des précipitations moyennes mensuelles des deux stations pluviométriques (1969-2007).....	09
Figure I.2: Précipitations moyennes annuelles des stations pluviométriques de SIDI MAKHLOUF et AIN EL IBEL 1967-2007	11
Figure I.3: Courbe des températures moyennes mensuelles de Djelfa 1986-2006	12
Figure I.4: Evolution de l'humidité relative moyenne mensuelle durant la période de 1995-2004	13
Figure I.5: Evolution de la vitesse de vent moyenne mensuelle interannuelle durant la période 1995-2004	14
Figure I.6: ABAQUE D'INDICE D'ARIDITE DE DEMARTONNE	15
Figure I.7: ABAQUE DE WUNDT MODIFIE PAR COUTAGNE	21
Figure II.1 : Carte topographique du synclinal de Ain EL Ibel-Sidi Makhlouf	26
Figure II.2: Carte géologique de la zone étude (synclinal de Ain EL Ibel)	30
Figure II.3 : Coupe stratigraphique lithologique de forage el yourth (ain el ibel).....	31
Figure II.4 : Coupe stratigraphique lithologique de forage ksar zeira	32
Figure II.5 : Carte de situation des sondages électriques	35
Figure II.6: Coupe géoélectrique profil A	38
Figure II.7: Coupe géoélectrique profil B	38
Figure II.8 : Coupe géoélectrique profil D	39
Figure II.9: Coupe géoélectrique profil O	40
Figure II.10 : Coupe géoélectrique profil K	40
Figure III.1 : Carte hydrogéologique de synclinal d'Ain el Ibel	45
Figure III.2 : Carte d'inventaire des points d'eaux de la zone d'étude	47
Figure III.3 : Carte piézométrique du synclinal de Ain El Ibel – Sidi Makhlouf (MAI 2002)	49
Figure III.4 : Carte de surveillance de réseau piézométrique Ain El Ibel – Sidi Makhlouf.....	52
Figure III.5 : Variation du niveau piézométrique du puit 2437-G8 en fonction du temps.....	53
Figure III.6 : Variation du niveau piézométrique du puit 2439-G8 en fonction du temps.....	53

Figure III.7 : Variation du niveau piézométrique du puit 2097-G7 en fonction du temps.....	54
Figure III.8: Variation du niveau piézométrique du puit 2103-G7 en fonction du temps	54
Figure III.8: Variation du niveau piézométrique du puit 2108-G7 en fonction du temps	55
Figure III.9: Variation du niveau piézométrique du puit 592-H7 en fonction du temps	55
Figure III.10: Variation du niveau piézométrique du puit 594-H7 en fonction du temps	56
Figure III.11: Coupe lithologique de forage Amra (F1)	59
Figure III.12: courbe caractéristique et droite de perte de la charge de forage AMRA (F1)	61
Figure III.13: Courbe de descente (forage AMRA F1)	63
Figure III.14: Courbe de remontée (forage AMRA F1)	64
Figure III.15: Coupe lithologique de forage Ain el Ibel (F2)	67
Figure IV.1 : prisme élémentaire de nappe libre	74
Figure IV.2 : conditions aux limites latérales du modèle	80
Figure IV.3: Carte de relief du synclinal d'Ain EL Ibel-Sidi Makhoulf	83
Figure IV.4 : Carte toit de l'aquifère d'Ain EL Ibel-Sidi Makhoulf	84
Figure IV.5 : Carte d'épaisseur du domaine modélisé (Ain EL Ibel-Sidi)	85
Figure V.5 : Localisation des forages AEP (Ain EL Ibel-Sidi Makhoulf)	89
Figure IV.6 : Localisation des puits de prélèvements agricoles (BIRH).	91
Figure IV.7 : comparaison des piézometries calculés et observés en 2002 (régime permanent)	94
Figure IV.8:Localisation Des Piézomètres Utilisés Comme Points De Contrôle Pour Le Calage	96
Figure IV.9: Calage en régime permanent et comparaison entre la piézométrie simulée et la piézométrie observée (mai 2002)	97
Figure IV.10 : Répartition des perméabilités (en m/s) obtenue a l'issue du calage	98
Figure IV.11 : La piézométrie simulée 2010 dans le cas du régime transitoire	101
Figure IV.12 : Evolution de la piézométrie entre 2002-2010	103
Figure IV.13 : Courbe piézométrique simulée sur le piézomètre 2439-G8	105
Figure IV.14 : Courbes piézométriques simulée et observée sur le piézomètre2439-G8	105
Figure IV.15 : Courbe piézométrique simulée sur le piézomètre 592-H7	106

Figure IV.17: Courbe piézométrique simulée sur le piézomètre 594-H7	106
Figure IV.19: Courbe piézométrique simulée sur le piézomètre 2437-G8	107
Figure IV.20 : Courbes piézométriques simulée et observée sur le piézomètre2437-G8	107
Figure IV.21 : Courbe piézométrique simulée sur le piézomètre 2108-G7	108
Figure IV.22 : Courbes piézométriques simulée et observée sur le piézomètre2108-G7	108
Figure IV.23 : Courbe piézométrique simulée sur le piézomètre 2103-G7	109
Figure IV.24 : Courbes piézométriques simulée et observée sur le piézomètre2103-G7.....	109
Figure IV.25 : Courbe piézométrique simulée sur le piézomètre 2097-G7	111
Figure IV.26 : Courbes piézométriques simulée et observée sur le piézomètre2097-G7.....	111
Figure V.1 : Rabattement de la nappe entre les piézométries simulées en 2010 et 2025	119
Figure V.2 : Scénario 1 (référence). Piézométrie simulée au piézomètre 2437-G8	120
Figure V.3: Scénario 1 (référence) .Piézométrie simulée au piézomètre 2439-G8	120
Figure V.4: Scénario 1 (référence) .Piézométrie simulée au piézomètre2097-G7	121
Figure V.5: Scénario 1 (référence) .Piézométrie simulée au piézomètre2103-G7	121
Figure V.6: Scénario 1 (référence). Piézométrie simulée au piézomètre2108-G7	121
Figure V.7: Scénario 1 (référence). Piézométrie simulée au piézomètre592-H7	122
Figure V.8: Scénario 1 (référence) .Piézométrie simulée au piézomètre594-H7	122
Figure V.9: Scénario 1 (référence) .Piézométrie simulée au piézomètre2099-G7	122
Figure V.10: Scénario 2. Piézométrie simulée par rapport au scénario de référence en 2025	124
Figure V.11: Scénario 2 .Piézométrie simulée au piézomètre 2437-G8	125
Figure V.12: Scénario .Piézométrie simulée au piézomètre 2439-G8	125
Figure V.13: Scénario2 .Piézométrie simulée au piézomètre2097-G7.....	126
Figure V.14: Scénario 2 .Piézométrie simulée au piézomètre2103-G7	126
Figure V.15: Scénario 2 .Piézométrie simulée au piézomètre2108-G7	126
Figure V.16: Scénario 2 .Piézométrie simulée au piézomètre592-H7	127
Figure V.17: Scénario 2 .Piézométrie simulée au piézomètre594-H7	127
Figure V.18: Scénario 2 .Piézométrie simulée au piézomètre2099-G7	127
Figure V.19: Scénario 3. Piézométrie simulée par rapport au scénario de référence en 2025	128
Figure V.20:Scénario 3.Piézométrie simulée au piézomètre 2437-G8	129

Figure V.21: Scénario 3 .Piézométrie simulée au piézomètre 2439-G8	129
Figure V.22: Scénario 3 .Piézométrie simulée au piézomètre2097-G7	130
Figure V.23: Scénario 3 .Piézométrie simulée au piézomètre2103-G7	130
Figure V.24:Scénario 3 .Piézométrie simulée au piézomètre2108-G7	130
Figure V.25:Scénario 3 .Piézométrie simulée au piézomètre592-H7	131
Figure V.26: Scénario 3 .Piézométrie simulée au piézomètre594-H7	131
Figure V.27: Scénario 3 .Piézométrie simulée au piézomètre2099-G7	131
Figure V.28: Scénario 4 .Piézométrie simulée par rapport au scénario de référence en 2025	133
Figure V.29: Scénario 4.Piézométrie simulée au piézomètre 2437-G8	134
Figure V.30:Scénario 4 .Piézométrie simulée au piézomètre 2439-G8	134
Figure V.31:Scénario 4 .Piézométrie simulée au piézomètre2097-G7	134
Figure V.32: Scénario 4 .Piézométrie simulée au piézomètre2103-G7	135
Figure V.32:Scénario 4 .Piézométrie simulée au piézomètre2108-G7	135
Figure V.33:Scénario 4 .Piézométrie simulée au piézomètre592-H7	135
Figure V.34:Scénario 4 .Piézométrie simulée au piézomètre594-H7	136
Figure V.35: Scénario 4 .Piézométrie simulée au piézomètre2099-G7	136

Annexe 1. Précipitation mensuelles ; Station d'Ain el bel (période 1969-2007)

ANNEE	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout
1969	10.64	13.71	10.52	0.00	16.20	0.00	11.10	61.50	12.10	12.00	4.00	0.80
1970	6.00	20.10	0.00	3.80	18.80	0.00	43.80	8.20	7.60	0.00	9.50	0.00
1971	26.00	5.70	58.50	22.60	24.30	8.70	57.00	6.40	18.00	15.90	10.50	2.10
1972	2.00	46.50	23.50	0.00	9.20	6.80	40.00	9.90	10.00	15.70	0.00	11.40
1973	6.50	1.50	19.10	22.60	3.50	19.00	50.50	40.50	11.55	37.90	0.00	0.00
1974	22.20	20.20	3.50	2.00	7.70	12.00	3.00	22.00	55.20	4.00	0.00	0.00
1975	30.20	2.00	4.50	6.30	2.20	23.60	10.00	14.80	42.00	5.50	54.10	8.20
1976	61.50	26.20	51.20	20.80	30.00	0.00	0.00	6.00	49.80	6.50	9.00	19.70
1977	8.00	7.00	58.00	1.30	1.90	10.60	1.00	0.00	3.80	0.00	0.00	4.30
1978	0.00	26.40	5.10	1.00	43.50	28.00	4.00	15.20	20.20	10.80	0.00	6.00
1979	32.50	0.00	0.00	20.32	10.00	36.40	55.90	33.90	14.90	0.00	0.00	11.00
1980	102.00	0.00	54.20	43.20	0.00	21.00	5.60	81.00	0.00	25.10	0.00	16.00
1981	43.70	0.00	0.00	24.70	21.10	22.00	23.20	148.70	11.60	0.00	0.00	0.00
1982	13.90	48.20	46.10	5.50	0.00	0.00	0.00	25.00	23.90	0.00	0.00	45.50
1983	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	31.90	0.00	0.00	0.00	0.00	18.80
1984	0.00	24.30	30.00	8.00	3.50	6.10	15.20	41.60	69.00	0.00	28.00	0.00
1985	31.00	38.00	0.00	54.50	0.00	0.00	58.50	35.90	45.60	25.70	31.00	30.20
1986	32.00	59.70	2.50	13.90	6.50	19.50	22.00	0.00	7.50	12.50	10.50	0.00
1987	0.00	4.00	35.20	49.60	23.80	19.50	16.00	13.00	13.00	39.80	0.00	8.00
1988	17.50	15.10	16.50	0.00	16.00	0.00	0.00	7.10	56.50	29.30	2.00	56.80
1989	24.10	7.50	17.50	11.20	62.20	0.00	16.00	71.90	131.90	19.00	28.00	57.00
1990	30.00	0.00	9.50	0.00	5.00	40.00	46.50	48.50	13.00	7.00	0.00	14.20
1991	39.00	57.00	10.10	0.00	30.00	5.00	26.40	30.30	137.50	0.00	16.50	0.00
1992	3.00	0.00	8.30	0.00	5.00	57.00	4.00	3.00	30.50	22.70	6.00	0.50
1993	15.10	16.45	13.40	17.30	18.00	7.50	13.50	0.00	0.00	15.50	1.00	2.00
1994	102.60	147.50	36.00	1.00	0.00	11.20	22.80	2.20	7.30	20.20	12.10	23.90
1995	13.60	39.20	4.00	23.00	58.00	30.50	35.50	80.10	44.40	24.30	27.30	11.00
1996	0.00	0.00	1.00	35.20	19.00	0.00	0.00	26.20	8.70	0.00	0.50	28.80
1997	100.70	25.90	31.60	34.10	5.80	22.10	10.20	37.80	29.10	2.00	0.00	13.00
1998	40.40	0.00	9.60	4.60	0.00	0.00	0.00	1.00	2.50	11.20	0.00	0.00
1999	42.90	19.20	52.50	17.20	21.30	2.00	0.00	1.00	6.50	0.00	2.70	10.10
2000	15.20	31.00	4.50	15.80	21.30	2.00	0.00	1.00	6.50	0.00	2.70	10.10
2001	29.10	46.30	2.00	11.50	10.10	0.00	4.70	10.50	5.80	3.70	9.70	15.50
2002	3.80	15.00	26.40	3.10	56.20	1.20	5.20	13.80	0.00	1.00	6.10	0.00
2003	2.00	80.80	41.50	25.30	2.00	0.00	21.10	20.20	77.90	0.00	0.00	39.70
2004	40.10	26.20	13.30	34.70	0.00	7.60	23.00	3.20	0.00	32.50	0.00	0.00
2005	58.60	74.00	11.50	17.90	32.90	27.50	0.80	24.70	28.40	0.00	4.20	4.30
2006	14.30	0.00	13.30	7.13	4.40	11.10	20.10	37.00	8.20	0.00	0.00	5.20
2007	41.60	24.10	41.50	3.20	0.00	2.60	0.21	17.04	13.13	2.78	8.77	8.52

Annexe 2.Précipitation mensuelles ; Station de Sidi makhlouf (période 1969-2007)

ANNEE	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout
1969	62.70	161.00	0.00	19.00	40.00	0.00	21.00	26.00	15.50	3.00	15.00	11.00
1970	20.00	14.00	0.00	0.00	14.00	0.00	14.00	0.00	0.00	0.00	38.00	0.00
1971	35.00	16.00	61.00	37.00	25.00	15.00	49.00	11.00	20.00	3.00	0.00	19.00
1972	2.00	10.00	9.00	10.00	0.00	6.00	20.00	3.00	16.00	17.00	2.00	0.00
1973	4.00	0.00	28.30	25.50	0.00	9.40	48.50	25.50	0.00	6.62	0.00	0.00
1974	40.81	86.58	0.96	10.24	9.00	14.00	0.00	32.00	55.00	0.00	0.00	0.00
1975	33.00	131.54	0.00	0.50	2.00	24.51	23.03	0.00	33.00	43.00	12.00	0.00
1976	20.48	54.04	5.20	0.00	10.30	2.20	3.00	4.00	28.80	0.00	9.35	3.46
1977	5.69	28.40	22.50	0.00	0.00	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1978	0.00	1.60	7.20	0.00	10.20	2.70	0.00	9.86	0.00	25.50	0.00	12.70
1979	31.00	6.00	0.00	3.00	3.00	19.00	6.30	1.20	2.20	0.00	0.00	2.00
1980	42.00	0.00	53.00	4.00	0.00	3.50	4.00	3.40	0.00	7.78	0.00	0.00
1981	59.00	0.00	44.74	46.31	22.81	12.74	48.25	28.23	20.73	5.68	5.43	14.72
1982	0.47	11.90	9.55	1.81	0.00	6.63	0.00	3.32	3.20	0.00	1.62	2.72
1983	2.00	0.00	11.42	4.78	0.00	0.30	5.30	6.43	1.00	0.30	0.00	4.05
1984	19.26	46.00	8.04	0.00	28.00	3.54	0.00	22.83	15.21	4.82	10.53	7.21
1985	0.00	0.00	12.30	30.50	0.00	0.00	41.40	0.00	8.50	0.90	0.00	0.00
1986	6.50	41.00	40.90	0.00	8.60	0.00	0.00	1.00	0.80	7.50	0.00	0.00
1987	0.40	13.50	27.50	23.60	6.50	0.40	4.70	12.90	1.20	19.10	0.00	0.00
1988	0.00	12.20	9.90	0.00	12.00	0.00	0.00	2.10	1.30	12.30	0.00	3.20
1989	0.40	0.00	8.50	25.30	58.00	0.00	4.00	60.00	16.20	7.00	7.00	9.00
1990	7.50	0.00	0.00	6.50	12.00	27.10	33.00	4.90	25.00	0.00	5.50	5.00
1991	17.50	30.00	7.00	1.90	9.50	0.00	28.00	6.50	32.50	0.00	2.50	0.00
1992	0.00	0.00	8.00	0.00	0.00	48.00	2.50	0.00	1.70	6.00	0.00	0.00
1993	0.00	0.00	2.00	0.00	7.00	19.00	17.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.00
1994	28.80	63.20	9.00	0.00	0.00	4.00	4.00	2.00	0.00	23.00	0.00	3.00
1995	11.00	15.80	3.00	23.00	38.00	20.00	37.00	8.00	4.00	21.00	4.00	9.00
1996	12.04	0.00	0.00	7.00	27.00	0.00	2.00	50.00	1.70	0.70	4.30	23.20
1997	64.50	20.00	7.00	13.00	5.00	27.00	13.00	7.20	13.60	2.00	0.00	3.00
1998	8.40	3.00	0.00	0.00	59.30	11.00	25.00	0.00	0.30	6.10	3.00	9.10
1999	44.00	9.00	16.20	32.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	11.00
2000	32.00	24.00	2.00	0.00	11.00	0.00	0.00	0.00	1.20	0.00	0.00	6.00
2001	39.00	8.00	1.00	26.00	9.00	4.00	0.00	16.00	2.00	0.00	2.71	13.00
2002	0.00	7.00	5.00	0.00	16.10	11.00	0.00	0.00	0.00	1.00	6.00	4.00
2003	9.00	27.00	14.00	1.00	0.00	0.00	2.20	28.50	29.00	8.00	0.00	13.00
2004	2.00	14.00	2.00	14.00	0.00	16.00	3.00	4.30	0.00	16.00	0.00	0.00
2005	21.00	15.00	1.00	0.00	37.00	16.00	0.00	44.00	22.00	1.00	1.00	3.30
2006	4.10	3.00	20.00	20.00	5.00	12.00	14.00	24.00	16.00	0.00	0.00	10.00
2007	9.10	16.00	0.00	0.00	0.00	7.10	0.00	0.00	1.20	4.00	5.00	0.95

Annexe 3. Réseau piézométrique de synclinal Ain el bel-Sidi makhoulouf

N°BIRH	Propriétaire	X	Y	degré y	degré x	Z(m)	Prof M	NS mai02
2095-G7	SAIHI Tidjani	548.319	416.483	34°20'58N	003°13'31E	1025	12.20	3.90
2096-G7	TOUIR Belgacem	546.893	415.459	34°20'25N	003°12'35E	1018	22.00	15.15
2097-G7 P03	TOUIR Ahmed	545.658	417.209	34°21'22N	003°11'47E	1029	9.00	3.00
2098-G7	GUORINI A.E.K	542.991	413.716	34°19'29N	003°10'02E	1000	70.00	25.85
2099-G7 P05	LAKHNACHE Oulmi	544.845	410.705	34°17'51N	003°11'14E	993	10.4	4.3
2100-G7	BOUKHATEME Med	540.745	406.806	34°15'45N	003°08'33E	966	15.20	12.00
2102-G7	GUIDJAR Med	540.062	411.085	34°17'43N	003°05'44E	991	20.00	17.00
2103-G7 P08	BENREZEGUE Med	536.409	410.423	34°15'23N	003°03'39E	976	45.00	30.00
2104-G7	CASERNE	533.228	406.099	34°14'40N	003°06'11E	961	16.20	10.60
2106-G7	FARE Saad	537.768	402.912	34°13'39N	003°07'37E	946	16.20	14.20
2107-G7	HASSIBI Moussa	539.319	402.918	34°12'53N	003°06'07E	943	106.00	10.75
2108-G7 P12	RAMDHAN Ramdhan	537.031	401.492	34°14'23N	003°06'16E	961	57.00	24.20
592-H7	DJRIDENE Djridene	530.064	395.245	34°09'31N	003°01'34E	910	50.00	7.40
593-H7	MAKHLOUF Hadbi	526.530	395.173	34°09'29N	002°59'16	923	11.30	9.70
594-H7	AIAD Achour	526.614	392.863	34°08'14N	002°59'16	900	6.00	3.50
596-H7	COMMUNAL	520.081	381.143	34°01'54N	002°55'03E	890	14.50	9.50
597-H7		522.002	382.133	34°02'26N	002°56'18E	896	15.50	14.55
598-H7		530.769	390.997	34°07'13N	003°02'01E	882	10.10	7.10
1921-G7	Communal	549.589	134.385	34°30'20N	003°14'24E	1217	20.00	10.90
2437-G8 P20	MECHERI NOUARI	548.728	128.557	34°27'11N	003°13'49E	1132	12.90	8.70
2438-G7		550.272	126.439	34°26'02N	003°14'49E	1147	14.30	13.75
2439-G8 P22	KHRFHACHE Mus	550.144	121.847	34°23'33N	003°14'43E	1088	50.00	8.40
1923-G7	Communal	543.116	127.727	34°26'45N	003°10'09E	1158	27.00	25.50

INTRODUCTION GENERALE

L'eau souterraine cette composante du cycle de l'eau, joue un rôle majeur pour l'homme et les milieux. Elle représente la ressource en eau potable, une source majeure pour l'irrigation et usages industriels.

Les eaux souterraines forment un milieu encore mal connu, mais unique. A la frontière entre sous sol et surface, les sources, puits, forages ont de tout temps exercé un vif attrait sur l'esprit humain. Ces eaux font partie de notre patrimoine et doivent être préservées. L'importance économique et environnementale des eaux souterraines fait de leur préservation un facteur de développement durable. Cependant, le développement socio-économique et les exigences de la vie moderne exercent beaucoup de contraintes sur les ressources hydriques de nappes. La surexploitation et des eaux souterraines engendrent souvent des déséquilibres écologiques pratiquement irréversibles.

Le synclinal d'Ain El Ibel Sidi Makhoulf couvrant une superficie de 647 km², appartenant à la dépression d'orientations Sud Ouest – Nord Est situé à une trentaine de kilomètres au Sud de la localité de Djelfa

Les fluctuations saisonnières du niveau de la nappe ont des conséquences désastreuses sur le fonctionnement du système aquifère d'Ain el bel permet de préserver le potentiel des ressources en eau, leur qualité, leur évolution, notamment face aux risques des modes de gestion adaptées.

Notre intérêt s'est porté sur la dépression piézométrique. L'étude est une contribution modeste, et consiste à la modélisation hydrodynamique de la nappe.

Les objectifs de la modélisation visés par cette étude sont nombreux entres autres nous citons : la quantification des débits d'eau transitant dans la nappe et la connaissance de la distribution des perméabilités permettant la reconstitution de la piézométrie ainsi pour mieux comprendre le fonctionnement hydrodynamique du système. En suite logique au schéma conceptuel de fonctionnement, un des objectifs aussi est de simuler le comportement du système selon des scénarios proposés.

Dans une première partie , on procède à une présentation de la nappe d'Ain El Ibel dans son contexte géologique, climatologique et hydrogéologique, on se réfère à l'histoire des études hydrogéologiques réalisées dans la région et à l'actualisation des données à savoir la climatologie et la piézométrie.

L'étude hydrogéologique de la nappe d'Ain El Ibel n'a pas été étudiée d'une façon très large, Les documents existant concernant cette nappe fournissent uniquement les données des débits des forages et les données de la piézométrie.

Pour la présentation synthétique des données, un moyen particulièrement bien adapté reste l'expression cartographique. Elle permet évidemment de bien représenter toutes les données spatiales objectives nécessaires à la caractérisation des modèles utilisables pour simuler le système.

La seconde partie, sera consacrée à l'hydrogéologie locale et la modélisation des écoulements du système aquifère en utilisant le logiciel PROCESSING MODFLOW, en régime permanent pour référence la piézométrie en 2002. Puis nous allons valider le modèle en régime transitoire à l'année 2010. Enfin nous présenterons le comportement de système selon des scénarios proposés. Le système doit permettre d'explorer ses tendances d'évolution et de simuler des Scénario d'intervention. C'est-à-dire visualiser la situation de l'aquifère en temps réel, et effectuer des prédictions à long terme.

Les résultats obtenus seront exploités par les ingénieurs et le planificateur de différents secteurs hydrauliques en l'absence de documents normatifs sur la gestion des eaux souterraines de la région d'Ain el bel.

I.1 Situation géographique du secteur d'étude

Le synclinal d'Ain El Ibel Sidi Makhlouf, s'insère dans le cadre géographique des hautes plaines Algériennes entre 02°57' et 03°20' de longitude Est et 34°07' et 34°28' de latitude Nord. A 30 Km environ au Sud de la localité de Djelfa, sur une superficie de 647 km² le synclinal s'étend sur 48 km suivant un axe NE - SW, et sur 18 km suivant un axe perpendiculaire, il est limité (Figure I.1) :

- Nord Est par Zakar et Djebel Tafara
- Nord Ouest, par Djebel Djellal Rharbi.
- à l'Ouest par Tadmit;
- Sud Ouest par Djebel Zergua

I.2 Morphologie :

I.2.1 La dépression d'Ain El Ibel

Le secteur étudié se situe dans l'Atlas saharien sud algérois, dans la partie SW des monts d'ouled Nail, formant une vaste dépression très complexe correspondant à un système synclinal très évasé à fond plat de direction NE-SW dont l'axe passe au niveau des localités de Sidi Makhlouf, Ain El Ibel et Ksar Timek mart.

Le flanc W est laminé par une grande faille de direction SW-NE passant par l'Oued Seddeur et Ain Roumia.

A l'W de cette faille, on trouve les affleurements gréseux assez élevés (Kef Roumia, Djebel El Hamra), brusquement interrompus par une grande faille de direction SW-NE (source d'El Yourh - Ksar Ahmera) qui paraît continuer la faille précédente et celle qui a décalé les Djebels Djellal Gharbi et Chergui.

La vaste dépression entre Sidi Makhlouf-Ain El Ibel est occupée par les grès Barrémiens à faibles pendages parfois sub-horizontaux, alternant avec des séries d'argiles versicolores.

La petite crête monoclinale directement au N d'Ain El Ibel n'est autre que la Barre aptienne en forme d'arc de cercle. Elle s'interrompt à l'E pour réapparaître au S de Zekkar et se continue ensuite vers le N le long de djebel Tafara.

Le réseau fluvial peu développé est représenté par des oueds qui se désèchent pendant la période estivale (Figure I.2).

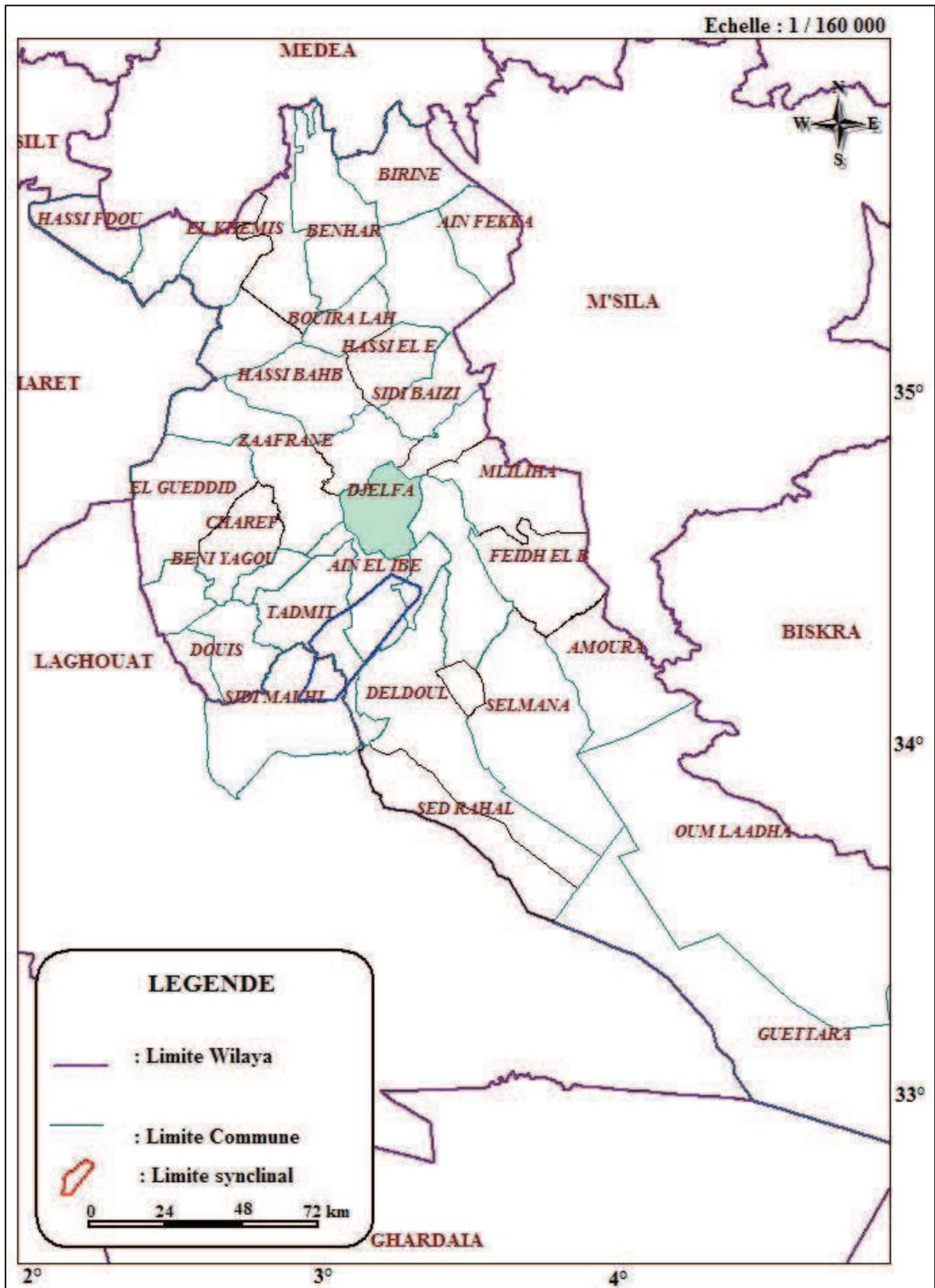


Figure I.1 : Carte de situation de la zone d'étude

I.3 Végétation

La végétation naturelle est très pauvre, elle se borne à quelques repousses de pâturage broutées par les troupeaux de chameaux et de moutons, Les principales formations végétales sont :

- le matorral : formation d'origine forestière, où subsiste des arbustes (romarin, cistes...etc.), il peut y avoir aussi quelques pins d'Alep (matorral arboré).

L'Alfa envahit à peu le matorral au fur et à mesure que disparaissent les espaces reliques forestiers et l'on passe à la Steppe.

La Steppe : formation basse et discontinue avec des graminées vivaces (Alfa, Sparte... etc.).

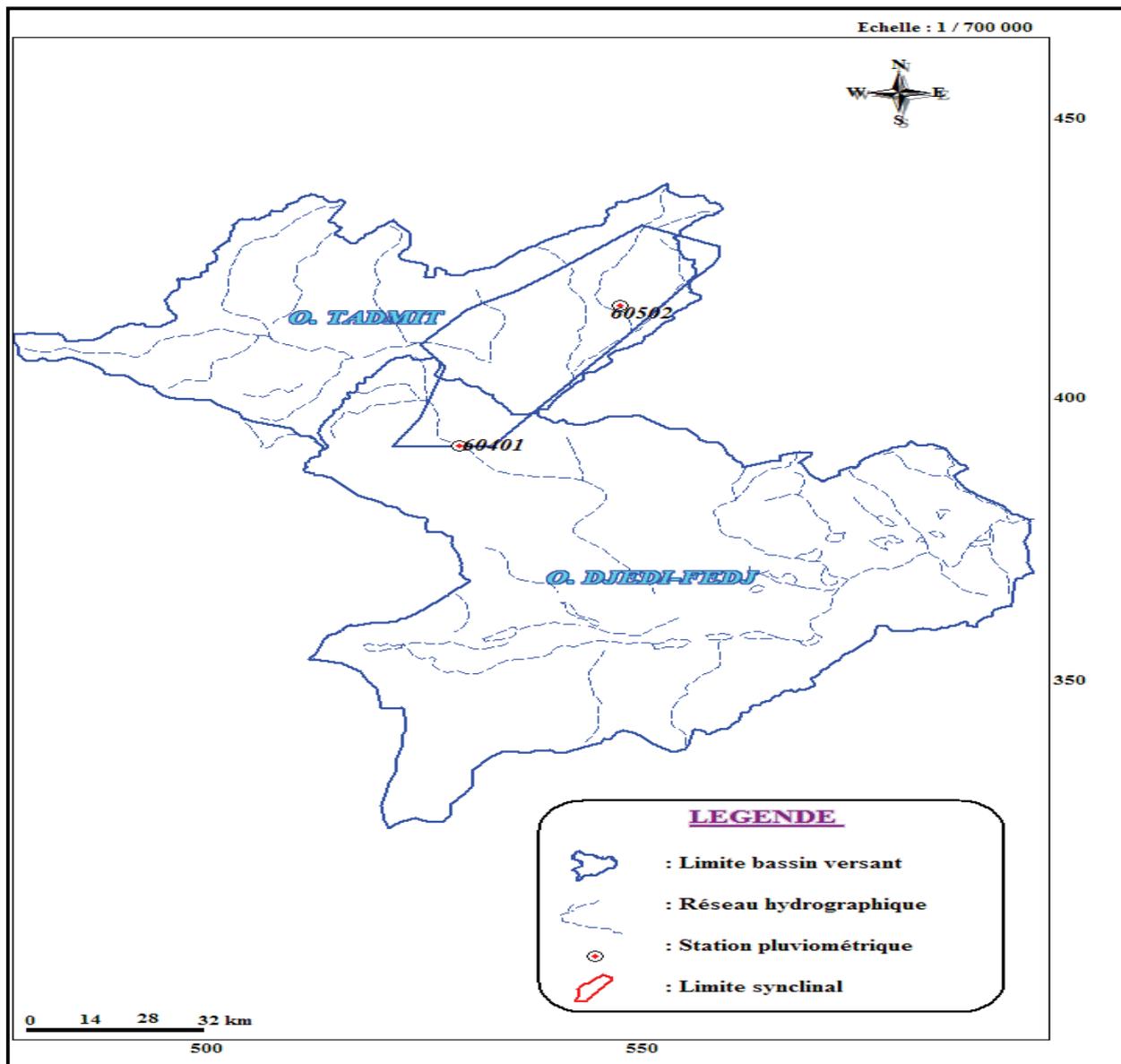


Figure I.2 : Carte des bassins versants

I.4 Contexte climatique

Introduction

Nous essayons de synchroniser les éléments du bilan d'eau dans le secteur d'étude, en utilisant les données d'une période récente. Les facteurs mesurés (pluviométrie, température) sont indispensables et leur connaissance permet de quantifier la ressource en eau et de déduire la fraction d'eau infiltrée qui conditionne la recharge des nappes souterraines.

D'une manière générale, le climat est conditionné par :

La température de l'air ($T^{\circ}\text{C}$), les précipitations (P mm), l'éloignement de la mer et la présence du relief.

Nous tenterons dans ce chapitre de déterminer ces paramètres hydroclimatologiques en se basant sur les données des deux stations météorologiques.

Tableau I.1 : Répartition et position des stations météorologiques (ANRH)

Nom de la station	Code ANRH	Coordonnées		Altitude Z(m)	Période
		X(m)	Y(m)		
Sidi MAKHLOUF	060401	529.00	392.00	886.00	(1969 /2007) 39ans
Ain El Ibel	060502	548.50	418.00	1000	
Djelfa	17-02	529.00	392.00	1040	

I.4.1 Les précipitations

Pour mieux connaître la pluviosité de notre zone d'étude, nous avons pris en considération les deux stations : Ain El Ibel, Sidi Makhlouf, sur une période allant de 1969 au 2007, telles qu'elles sont données par l'ANRH.

I.4.1.1 Précipitation mensuelles

Tableau I.2: Répartition des pluies moyenne mensuelle des deux stations pluviométrique période 1969-2007 (ANRH)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JU	AU	période
Ain El Ibel	27,22	24,84	19,64	14,42	15,11	11,81	17,92	25,64	26,25	10,32	7,29	12,37	39ans
Sidi Makhlouf	17,81	22,79	11,72	9,90	12,44	8,85	12,13	11,49	9,97	6,52	3,46	5,30	

Nous constatons que dans la figure I .3 que la répartition mensuelle des précipitations (1969-2007) des deux postes pluviométriques, montre que la période pluvieuse s'étale sur les mois suivants :

- Septembre, Octobre et Novembre avec une période humide.
- Mars, Avril et Mai avec une période à pluviosité moyenne.
- Décembre, Janvier, Février, Juin, Juillet, et Août avec une période sèche.

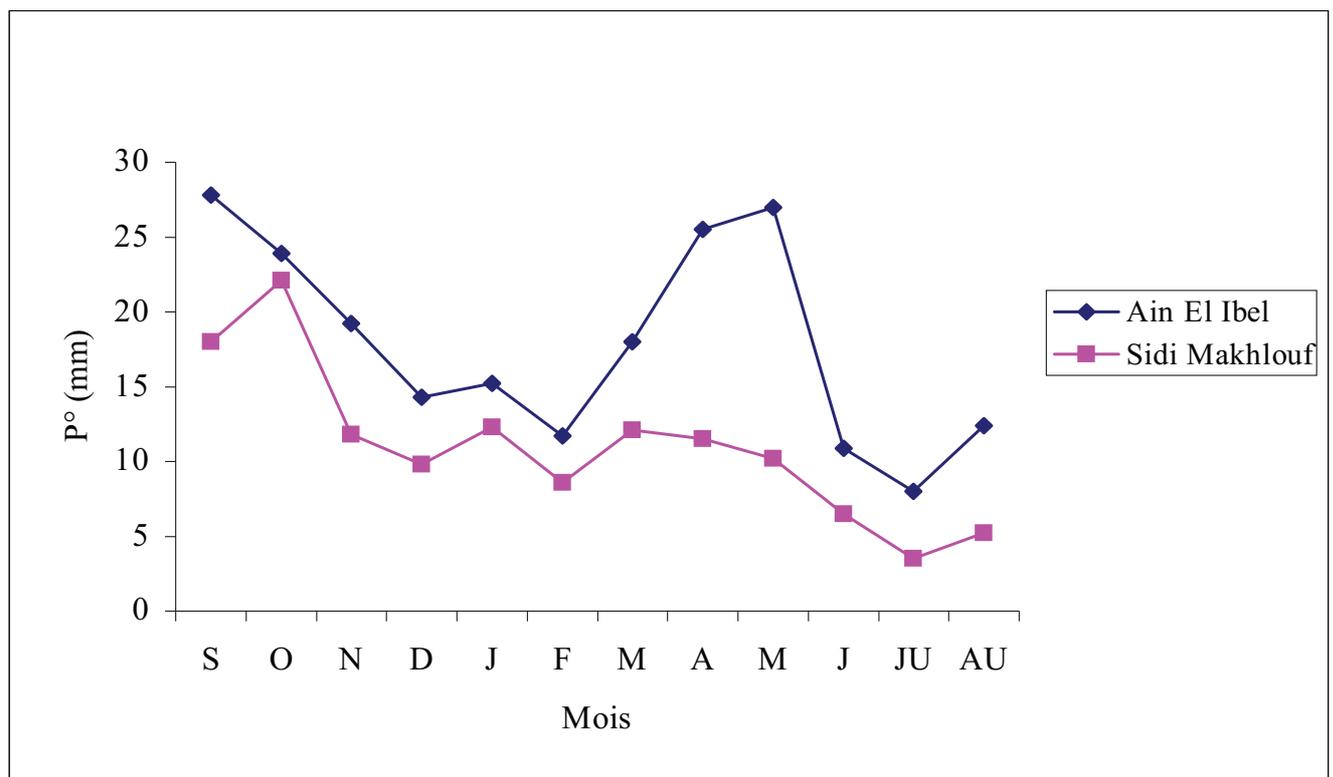


Figure I.3 : Répartition des précipitations moyennes mensuelles des deux stations pluviométriques (1969-2007)

I.4.1.2 Pluviométrie moyenne annuelle

Les valeurs des pluies moyennes annuelles enregistrées depuis 1969 jusqu'à 2007 varient de 41 à 390 mm, ce qui explique l'irrégularité des précipitations d'une année à l'autre. Les valeurs des pluies moyennes annuelles sont présentées dans le tableau I.3 et figure I.4.

Tableau I.3: Pluies moyennes annuelles 1969-2007 (ANRH)

Station Année	Sidi Makhlouf	Ain El Ibel
1969	374,20	152,57
1970	100,00	117,80
1971	291,00	255,70
1972	95,00	175,00
1973	147,82	212,65
1974	248,59	151,80
1975	302,59	203,40
1976	140,82	280,70
1977	59,59	95,90
1978	69,76	160,20
1979	73,70	214,92
1980	117,68	348,10
1981	308,63	295,00
1982	41,21	208,10
1983	35,58	50,70
1984	165,45	225,70
1985	93,60	350,40
1986	106,30	186,60
1987	109,80	221,90
1988	53,00	216,80
1989	195,40	446,30
1990	126,50	213,70
1991	135,40	351,80
1992	66,20	140,00
1993	49,00	119,75
1994	137,00	386,80
1995	193,80	390,90
1996	127,94	119,40
1997	175,30	312,30
1998	125,20	69,30
1999	114,20	175,40
2000	76,20	110,10
2001	120,71	148,90
2002	50,10	131,80
2003	131,70	310,50
2004	71,30	180,60
2005	161,30	284,80
2006	128,10	120,73
2007	43,35	163,44
Moy	132,38	212,83

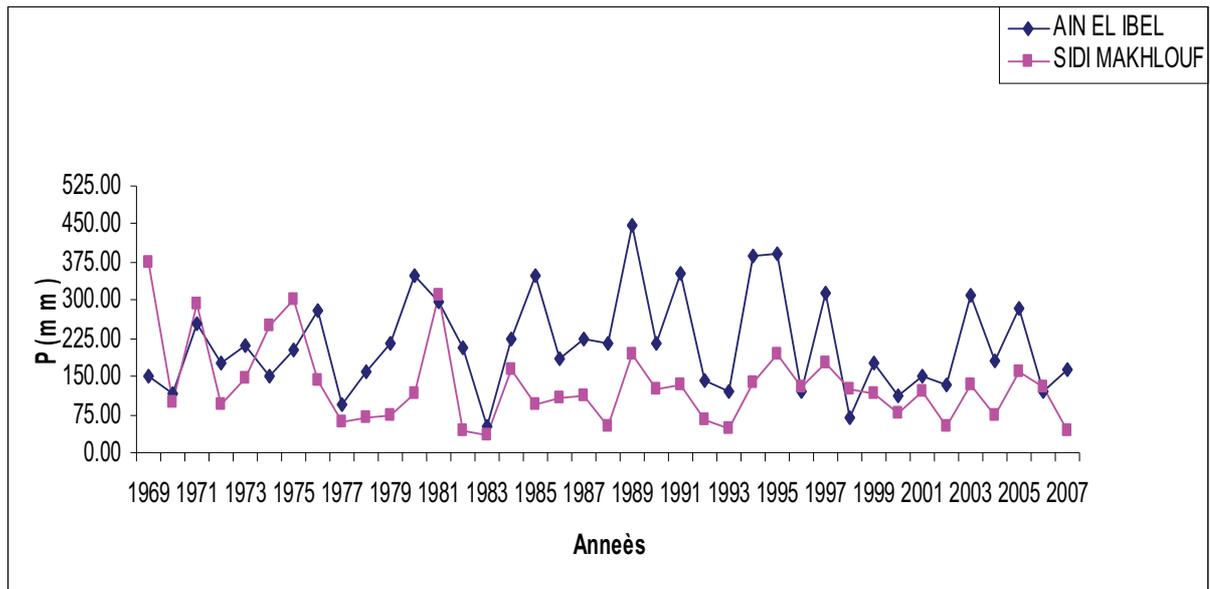


Figure I.4: Précipitations moyennes annuelles des stations pluviométriques de SIDI MAKHLOUF et AIN EL IBEL 1967-2007 (ANRH)

I.5 Les températures de l'air

Les renseignements sur les variations mensuelles de la température ont été prélevés de la station météorologique de Djelfa, sur une période de 20 ans (1986-2006).

Tableau I.4: Températures moyennes mensuelles de Djelfa 1986-2006(ANRH)

Mois T° c	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Moy annuelle
Max	9.54	12.03	15.04	18.06	24.06	29.46	33.60	33.38	27.59	21.06	14.76	10.94	20.79
Min	0.38	1.57	3.14	5.40	10.64	14.98	18.25	18.12	13.9	9.34	5.18	2.35	8.60
Moy	4.96	6.80	9.09	11.73	17.35	22.22	25.92	25.75	20.74	15.20	9.97	6.64	14.70

Le mois le plus froid de l'année est Janvier, avec une température moyenne avoisinant de 5°C.

Les mois Juillet, Août sont les plus chaude avec des températures moyenne allant de 20.74°C à 25.92°C.

La répartition des températures moyennes mensuelles est donnée dans la figure I.5

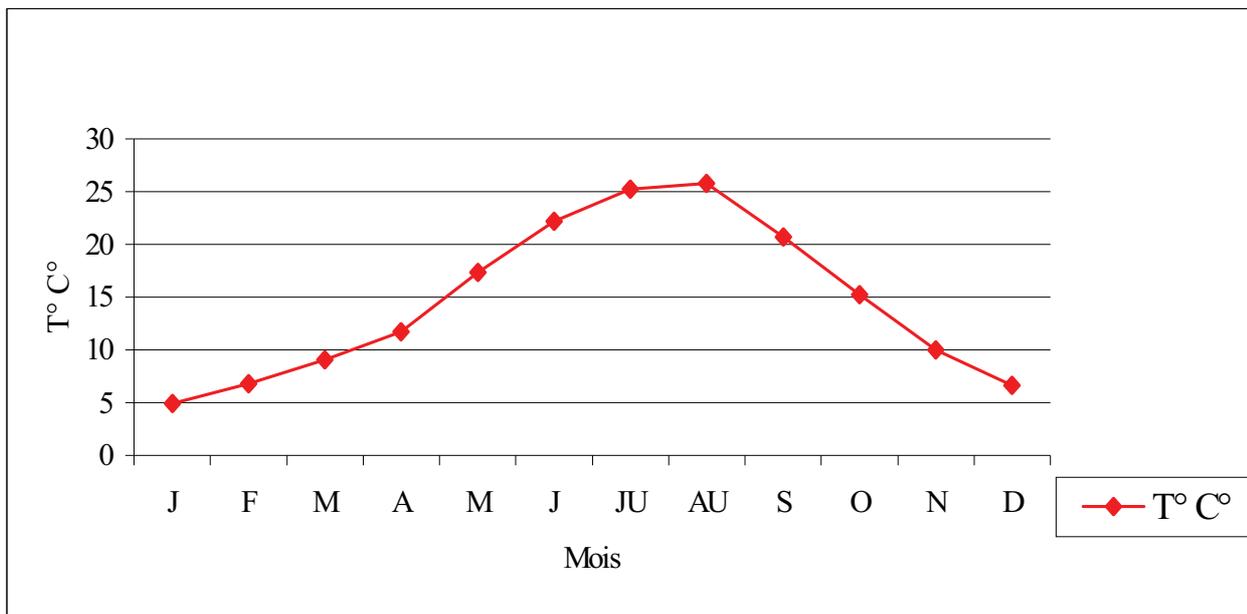


Figure I.5: Courbe des températures moyennes mensuelles de Djelfa 1986-2006

Nous distinguons deux saisons dans l'année : saison froide et saison sèche représentées dans le tableau :

température Nov- Avr.	température moyenne	température Mai- Oct
8,20	14,70	21,20

I.5.1 Une saison froide

Elle est longue, et débute du mois Novembre jusqu'au mois d'avril avec une température moyenne de 8,20° c inférieure à la température moyenne annuelle qui est de l'ordre de 14,70

I.5.2 Une saison chaude

Elle débute du mois Mai jusqu'au mois d'octobre avec une température moyenne de 21,20°c supérieure à la température moyenne annuelle qui est de l'ordre de 14,70

I.6 L'humidité relative

La variation saisonnière de l'humidité relative est représentée sur la figure I.5. Il apparaît que la saison froide présente une humidité relative, élevée avec un maximum de (78.2%), obtenu au mois de janvier, d'autre part, l'humidité relative ne dépasse pas (50%) durant la saison sèche (juin- août), avec un minimum pouvant atteindre (35.1%) au mois de juin.

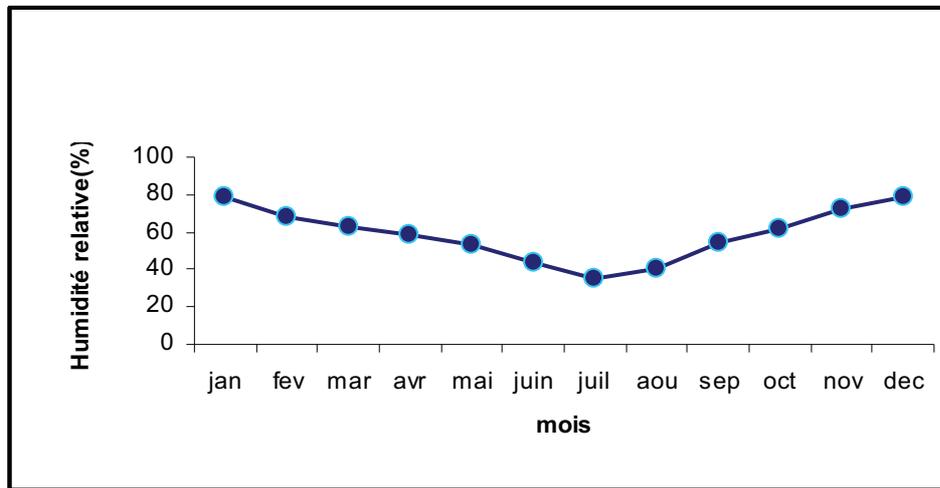


Figure I.6: Evolution de l'humidité relative moyenne mensuelle durant la période de 1995-2004 (ANRH)

I.7 Les vents

Le vent est un facteur climatique, d'une importance primordiale contribuant aux façonnages arides et désertiques. En jouant le rôle d'un agent d'érosion, de transport et d'accumulation, ce facteur est susceptible d'influencer les processus d'évaporation et d'évapotranspiration.

La figure I.6 montre que la variation saisonnière de la vitesse du vent durant la période, d'observation reste quasi constante. D'autre part, la valeur maximale de la vitesse du vent ne dépasse pas **4.83 m/s** (avril) ; tandis que la valeur minimale (**3.48 m/s**) est observée au mois de septembre.

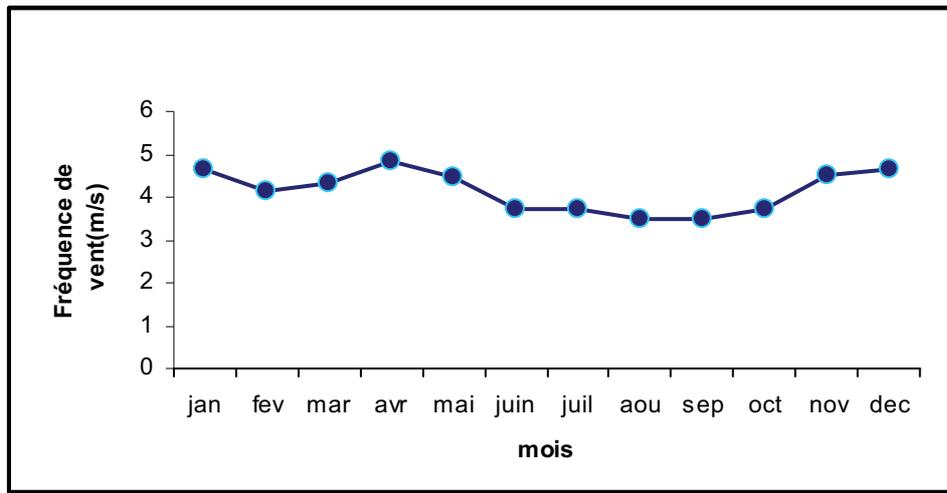


Figure I.7: Evolution de la vitesse de vent moyenne mensuelle interannuelle durant la période 1995-2004 (ANRH)

I.8 Les régimes thermiques

Afin de pouvoir déterminer le climat de notre zone d'étude, on utilise un certain nombre de méthodes, en prenant en compte des paramètres simples et facile à calculer :

I.8.1 Indice d'aridité de DEMARTONNE

En fonction des précipitations et de la température, on détermine l'indice d'aridité (A) qui s'énonce comme suit :

$$(I-1) \quad A = P / T + 10$$

P : Précipitation moyenne annuelle en mm.

T : Température moyenne annuelle en c°.

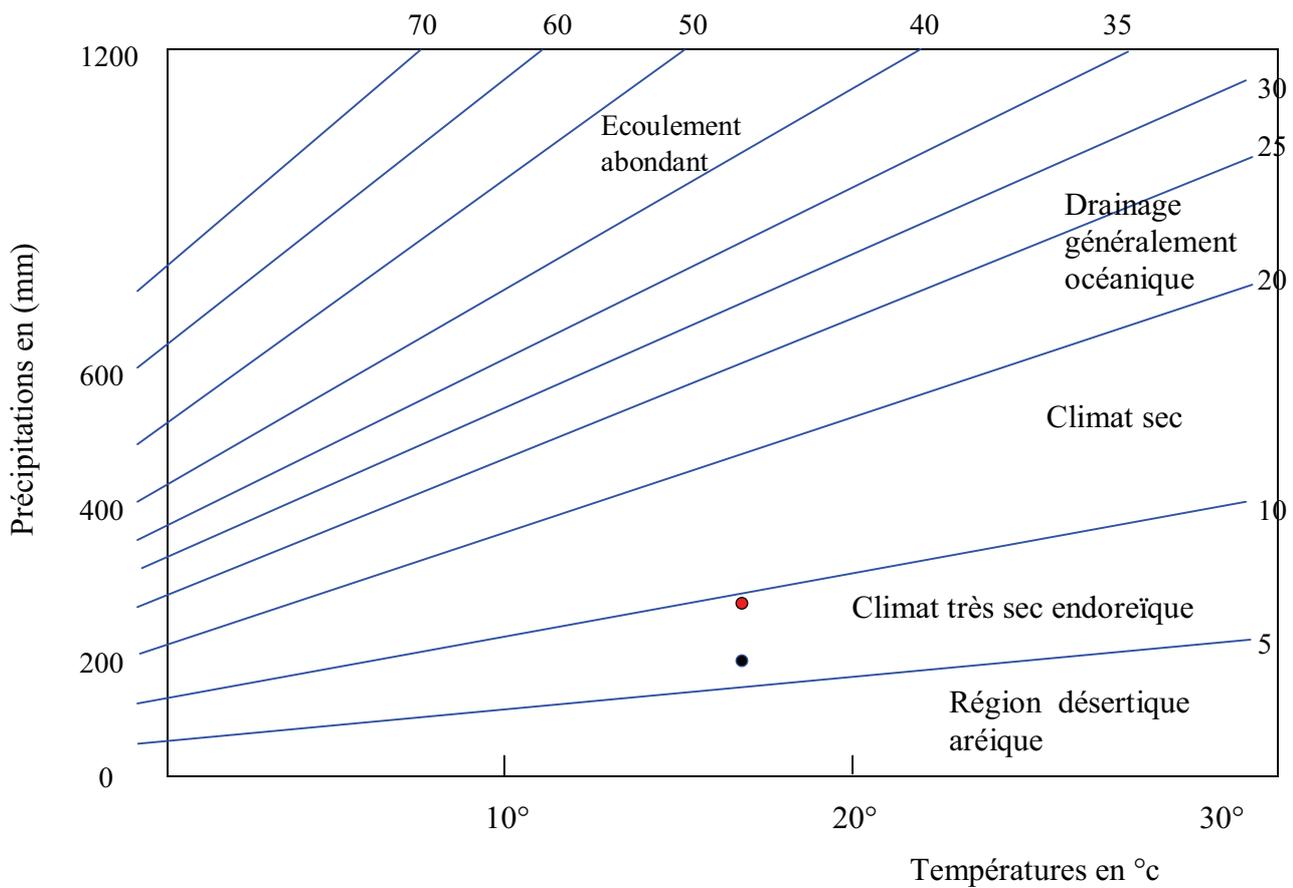


Figure I.8: ABAQUE D'INDICE D'ARIDITE DE DEMARTONNE.

- Station d'Ain El Ibel.
- Station de Sidi Makhlouf.

Pour les deux stations, la valeur de l'indice d'aridité est :

Station	A/ indice d'aridité
Ain El Ibel	9.75
Sidi Makhlouf	5.88

On remarque que dans toutes les stations que : $A < 10$, Donc la région d'étude est soumise à un climat aride, d'après l'abaque de DEMARTONNE (climat très sec endoréique) (Voir Figure I.8).

I.9 Le déficit d'écoulement ou Evapotranspiration

Exprime la quantité d'eau perdue par évaporation et transpiration biologique.

Cette donnée climatologique, dépend de plusieurs facteurs variants dans le temps et dans l'espace, on distingue :

- Une évapotranspiration potentielle, ETP.
- Une évapotranspiration réelle, ETR.

I.9.1 Evapotranspiration Potentielle ETP

C'est l'évapotranspiration d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau pour évaporer la quantité d'eau maximale permise par les conditions climatiques données.

Plusieurs formules empiriques, peu adoptées aux zones arides, permettent l'estimation de ce paramètre.

I.9.1.1 Formule de THORNTHWAITE (1948)

$$ETP = K 1.6 \left(10 T / I \right)^a \quad (I-2)$$

$$\text{Avec } I = \sum_{i=1}^{12} \left(i = T / 5 \right)^{1.514} \quad (I-3)$$

$$a = 0.49239 + (1792 \times 10^{-5} I) - (771 \times 10^{-7} I^2) + (675 \times 10^{-9} I^3) \quad (I-4)$$

ETP : évaporation potentielle (mm)

T : température moyenne mensuelle (°c)

I : indice thermique mensuel

Et aussi nous obtenons :

Mois	sep	oct	nov	dec	janv	fev	mar	avr	mai	jun	juil	août	$I = \sum_{i=1}^{12}$
$(i = T/5)^{1.514}$	8.62	5.38	2.84	1.53	0.98	1.59	2.47	3.63	6.57	9.56	12.08	11.96	67.25

D'où :

$$a = 0.49239 + 1.20512 - 0.34868 + 0.20529$$

$$a = 1.554$$

Les résultats obtenus sont insérés dans le tableau I.5 ci - dessous :

Tableau I.5: ETP moyennes mensuelles et annuelles calculées par la formule de THORNTHWAITE à la station de Djelfa (1986-2006).

Station	Djelfa (1986- 2006)			
Paramètres	T°c	ETP mm	K	K x ETP mm
Mois				
Sep	20.74	92.13	1.03	94.89
Oct.	15.20	56.83	0.97	55.12
Nov.	9.97	29.50	0.86	25.37
Dec	6.64	15.70	0.84	13.18
Jav	4.96	9.97	0.87	8.67
Fev	6.80	16.28	0.85	13.83
Mar.	9.09	25.56	1.03	26.32
Avr.	11.73	37.99	1.10	41.78
Mai	17.35	69.80	1.21	84.45
Jun	22.22	102.52	1.22	125.07
Jul	25.92	130.28	1.24	161.54
Aou	25.75	128.91	1.16	149.53
Moyenne annuelle	176.41	715.47	/	799.80

I.6.1.2 Formule de SERRA

Elle est la même que la formule de THORNTHWAITE avec un changement au niveau de l'indice a

$$ETP = K 16 (10 T / I)^a \quad (I-5)$$

12

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \text{ tel que } i = 0.09 T^{3/2} \quad (I-6)$$

$$\text{et : } a = 1.6 (I / 100) + 0.5 \quad (I-7)$$

ETP : évapotranspiration moyenne mensuelle (mm).

T : température moyenne mensuelle (°c).

I : indice thermique annuel.

i : indice thermique mensuel.

a : constante dépend de I.

K : coefficient d'ajustement mensuel;

Nous obtenons :

Mois	sep	oct	Nov	dec	janv	fev	mar	avr	mai	jun	juil	août	$I = \sum_{i=1}^{12}$
$i = 0.09 T^{3/2}$	8.50	5.33	2.83	1.54	0.99	1.59	2.46	3.61	6.50	9.42	11.88	11.76	66.41

$$a = 1.6 (66.41 / 100) + 0.5$$

$$\text{D'où : } a = 1.56$$

Les résultats obtenus par la formule de SERRA sont insérés dans le tableau I.6 suivant :

Tableau I.6: ETP moyennes mensuelles et annuelles calculées par la formule de SERRA à la station de Djelfa (1986-2006).

Station	Djelfa (1986- 2006)			
Paramètres	T°c	ETP mm	K	K x ETP mm
Mois				
Sep	20.74	94.80	1.03	97.64
Oct.	15.20	58.33	0.97	56.58
Nov.	9.97	30.18	0.86	25.95
Dec	6.64	16.01	0.84	13.45
Jav	4.96	10.15	0.87	8.83
Fev	6.80	16.60	0.85	14.11
Mar.	9.09	26.13	1.03	26.91
Avr.	11.73	38.92	1.10	42.81
Mai	17.35	71.72	1.21	86.79
Jun	22.22	105.55	1.22	128.77
Jul	25.92	134.30	1.24	166.53
Août	25.75	132.89	1.16	154.15
Moyenne annuelle	176.41	735.59	/	822.53

On constate que :

- Les résultats obtenus par les deux formules sont approximativement les mêmes.
- Les valeurs faibles, sont enregistrées durant les mois de (décembre, janvier et février) avec 8 mm en Janvier, et les plus grandes valeurs en Eté (juin, juillet et Août) avec 164 mm en Juillet.

K : représente le facteur de correction, il est fonction du mois et de la latitude ($L = 36^\circ. 07'$)

La valeur de l'ETP annuelle trouvée est de 799 mm \approx 800 mm pour un indice thermique annuel $I = 67.25$, alors, les valeurs de l' ETP sont largement supérieures aux précipitations.

I.9.2 Evapotranspiration Réelle ETR

C'est la quantité d'eau effectivement évaporée et transpirée.

Pour son évaluation, plusieurs formules empiriques ont été mises en évidence, telles que la formule de TURC, COUTAGNE, WUNDT.

I.9.2.1 Formule de TURC (1954)

Applicable à tous les climats et s'écrit sous la forme :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + P^2/L^2}} = P / \sqrt{A} \quad (I-8)$$

$$\text{avec } A = 0.9 + P^2/L^2 \quad (I-9)$$

$$L = 300 + 25 T + 0.05 T^3 \quad (I-10)$$

et $ETR \leq P$.

P : précipitations moyennes annuelles (mm).

T : températures moyennes annuelles (°c).

L : pouvoir évaporant en fonction de la T (°c).

Station \ Paramètres	T °c	L	P mm	ETR mm
Ain El Ibel	14.70	826.32	212,83	204
Sidi Makhlouf			132,38	129

I.9.2.2 Formule de COUTAGNE

$$ETR = P - \lambda P^2 \quad (I-11)$$

Cette formule tient compte essentiellement des précipitations et des températures, son application est restreinte à la condition suivante :

$$(1/8) \lambda < P < (1/2) \lambda \quad (I-12)$$

$$\text{Avec : } \lambda = 1 / (0.8 + 0.14 T) \quad (I-13)$$

ETR : évapotranspirations réelles (mm).

P : précipitations moyennes (mm).

T : températures moyennes annuelles (°c).

Remarque :

Les résultats obtenus par cette méthode, ne sont pas pris en considération, car les conditions d'application de cette formule ne sont pas présentes.

I.9.2.3 Méthode de WUNTD

Cet abaque est fonction des températures et des précipitations moyennes annuelles, il permet d'estimer le déficit d'écoulement que l'on assimile à l'ETR. (Voir Figure I.9)

Station \ Paramètres	P mm	ETR mm
Ain El Ibel	212,83	230
Sidi Makhlouf	132,38	205

Ces valeurs sont supérieures à celles des précipitations.

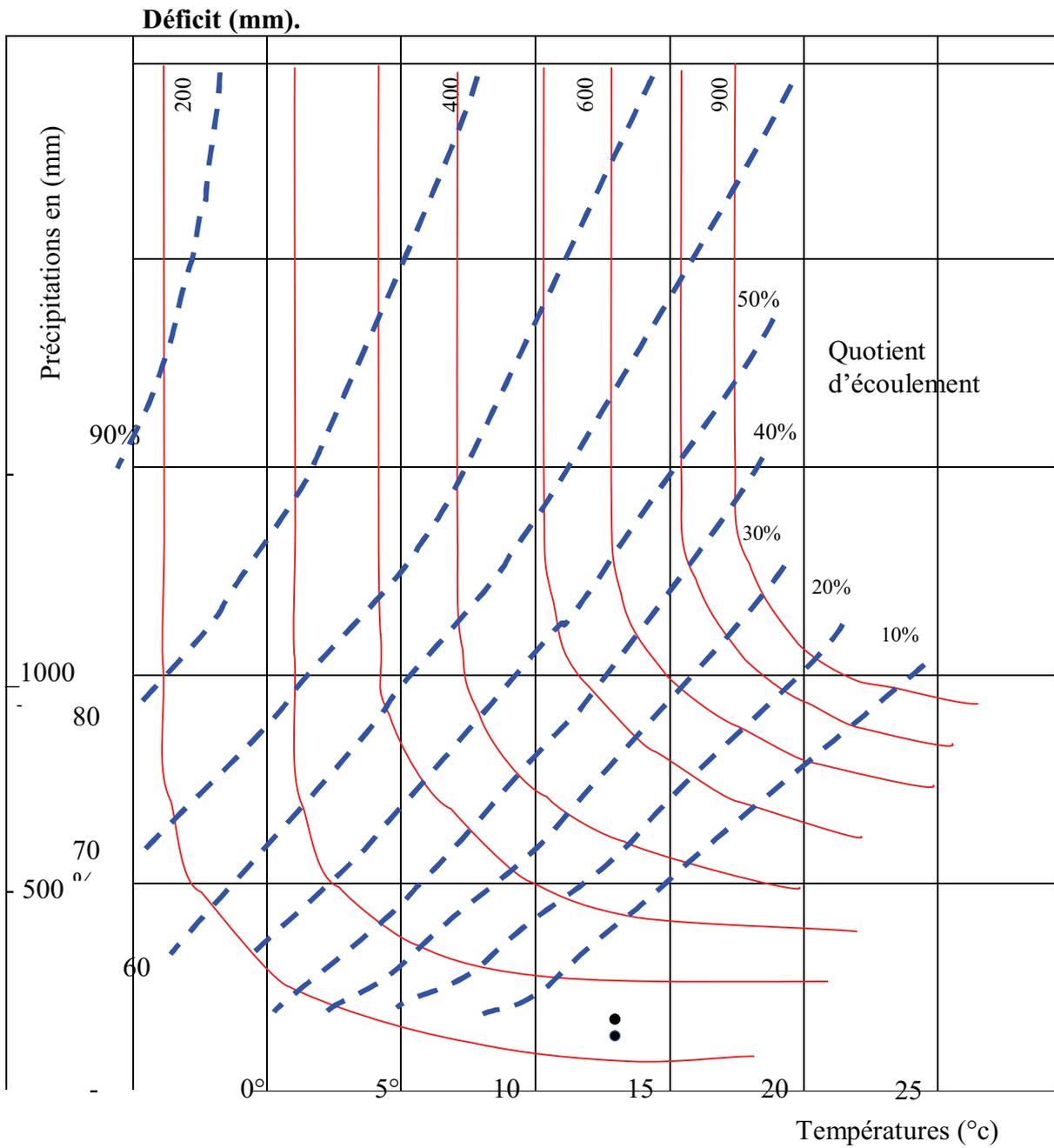


Figure I.9: ABAQUE DE WUNDT MODIFIE PAR COUTAGNE

- Station d'Ain El Ibel.
- . Station de Sidi Makhoulf

I.10 Le Ruissellement

I.10.1 Estimation du ruissellement par la formule de TIXERON-BERKALOFF

$$R = P^3 / 3 E^2 \quad (I-14)$$

R : ruissellements moyens annuels (mm).

P : pluviosités moyennes annuelles (mm).

E : évaporations potentielles (mm).

On prend l'évaporation potentielle $E = 800$ mm, calculée avec la méthode de THORNTHWAITE (Castany.G.1982)

Paramètres Station	P mm	Bilan THORNTHWAITE	TIXERON BERKALOFF
		ETP mm	R mm
Ain El Ibel	212,83	800	5,02
Sidi Makhlouf	132,38		1,21

I.10.2 Estimation de la lame d'eau infiltrée et essais de bilan

A partir de la formule du bilan hydrique (Touaibia.B.2004) et connaissant la valeur de la lame ruisselée, et nous en déduisons celle de l'infiltration.

$$P = E + R + I \quad (I-15)$$

P : précipitations moyennes annuelles (mm).

E : évapotranspirations réelles (mm).

R : lames moyennes ruissellées (mm).

I : lames infiltrées (mm)

Paramètres Station	P mm	E =ETR (mm)	R (mm)	Infiltration : (I)
				mm
Ain El Ibel	212 ,83	204	5,02	3,81
Sidi Makhlouf	132,38	129	1,21	2.17

Remarque

Ces résultats ne sont que théoriques, ne tiennent pas compte de la morphologie et de la lithologie des terrains traversés, ni du couvert végétal et ni de la pente.

I.11 Conclusion

La région d'étude (Synclinal d'Ain El Ibel-Sidi Makhoulf) est caractérisée par un climat aride aux Hivers froids et aux Etés chauds.

La température moyenne est de l'ordre de (14.7°C) avec un écart d'environ (19.7 °C) entre le pôle froid (décembre, janvier et février) où la température atteint (6.13°C) et le pôle chaud correspondant aux mois de juillet, août où la température atteint (25.8 °C), traduisant une continentalité assez marquée.

Les précipitations saisonnières, ont lieu essentiellement au printemps et en automne, elles diminuent du Nord vers le Sud et elles sont irrégulières.

L'estimation de l'évapotranspiration par des différentes méthodes a donné des résultats disproportionnés.

L'ETR estimée à l'aide de cette méthode est égale à : (voir tableau ci dessous)

Stations	E T R	% P
Ain El Ibel	204 mm	212,83
Sidi Makhoulf	129 mm	132,38

. La lame ruisselée et la lame infiltrée sont estimées respectivement à :

Stations	R	I (mm)
Ain El Ibel	5,02mm	3,81mm
Sidi Makhoulf	1,21mm	2.17mm

Ces résultats ne tiennent compte ni de la nature lithologique des terrains traversés, ni de leurs pentes, ni de l'intensité des précipitations et ni du couvert végétal, c'est des résultats théoriques.

II.1 Cadre géologique

L'existence des eaux souterraines est conditionnée par un critère géologique, qui comprend des conditions lithologiques et structurales, assurant un rôle décisif dans l'existence ou non de l'aquifère. Le second critère est d'ordre climatique ou paléo climatique local ou régional, qui détermine les conditions de recharge des nappes souterraines (**Castany, 1982**).

La géologie permet aussi de quantifier les réservoirs aquifères et de connaître leurs types de nappes, ainsi que leurs conditions aux limites selon la distribution des faciès géologiques.

De ce qui découle, tout raisonnement hydrogéologique doit s'asseoir sur une meilleure compréhension de la géologie du site en question. Le présent chapitre expose, un survol rapide de la géologie régionale, élaborée à la base d'une compilation bibliographique.

II.1.1 Relief de la zone d'étude

L'analyse des cartes topographiques (Figure II.1) qui couvrent notre zone d'étude, montre que la zone d'étude est divisée en deux reliefs :

II.1.1.1 Domaine montagneux

a) Djebels Djellal Gharbi et Chergui :

Ils forment le flanc sud du synclinal de Djelfa, d'altitude moyenne qui tourne autour de 1240 m pour Djellel Gharbi et autour de 1260 m pour Djellel Chergui.

Les valeurs de pentes dans cet ensemble sont supérieures à 20 %.(**Mahrour M.1965**)

b) L'ensemble de djebels Zerga-Tafara :

C'est un vaste anticlinal orienté (SW-NE), traversé par la route (Ain El Ibel - Messaâd).

Les lignes de crêtes sont à une altitude sub-égale, séparées par des couloirs étroits.

L'ensemble de djebels se relève insensiblement du SW (1000 m) vers le NE (1363 m).

(**Mahrour M.1965**)

II.1.1.2 La dépression d'Ain El Ibel

C'est une vaste zone déprimée, située à l'W de l'ensemble anticlinal des djebels Zerga-Tafara, allant de Sidi Makhoulf au S jusqu'au Zakkar au N, limitée à l'W par djebel El Azreg. La pente est inférieure ou égale à 8 %, elle diminue progressivement vers le S.

L'ensemble de la dépression est drainé par l'Oued Tadmit qui traverse le djebel Zerga pour rejoindre ensuite l'Oued Messaad à l'E et l'Oued El Ibel qui se termine dans la ville de Ain El Ibel qui constitue le niveau de base des écoulements des eaux (**Basseto D et Guillemot J.1971**)

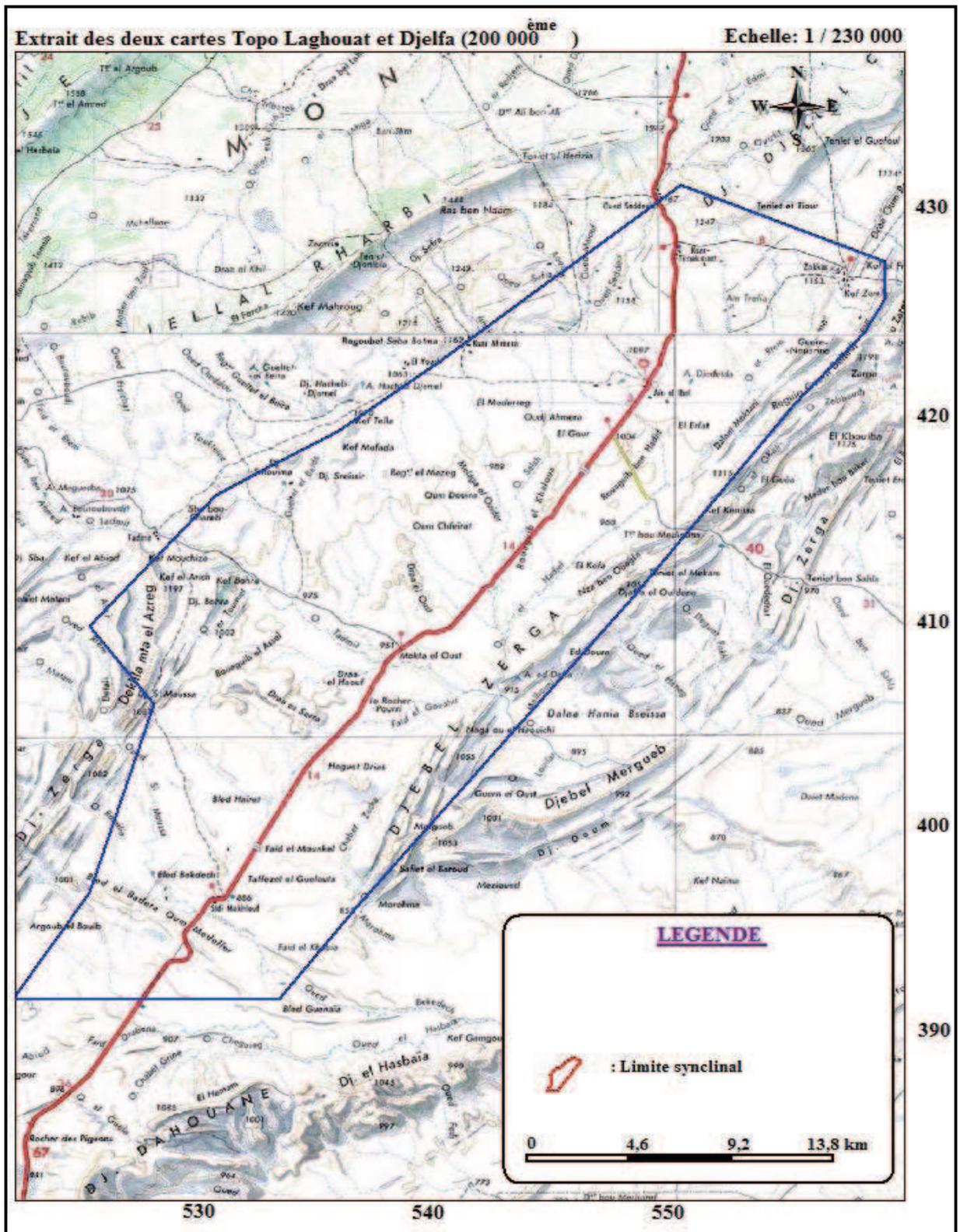


Figure II.1 : Carte topographique du synclinal d'Ain EL Ibel-Sidi Makhlouf

II.1.2 Cadre géologique général

point de vue géologique (Figure II.2) le secteur d'étude correspondant à la dépression d'Ain El ibel est localisé au niveau de l'Atlas saharien dans la partie sud - ouest des Monts des Ouled Nail , à l'emplacement d'un sillon subsident péri-cratonique où se sont accumulées durant le Mésozoïque et le Cénozoïque d'épaisses séries néritiques et continentales dont la surrection et le plissement se sont effectuées lors de l'orogénèse alpine . Au point de vue structural la région d'Ain El ibel correspond à un vaste synclinorium dont l'axe d'orientation nord est - sud ouest passe au niveau des localités de Sidi Makhlouf, Ain El Ibel et Ksar Timekmert . Le synclinal d'Ain El Ibel est représenté par une série essentiellement détritique barrémienne recouverte de temps à autre par des dépôts continentaux quaternaires discordants sur les termes les plus anciens.(**POUGET M.1977**)

II.1.3 Etude lithostratigraphique (POUGET M.1977) :

II.1.3.1 Le jurassique supérieur

Le Jurassique supérieur affleure au coeur des anticlinaux pincés limitant à l'Ouest et à l'Est le synclinal d'Ain El Ibel, il est constitué de la base au sommet par :

- Des alternances de marnes grises, de calcaires argileux en bancs décimétriques et de calcaires oolithiques, cette série a été attribuée au Kimméridgien.
- 100m de calcaires gris à rares passées de marnes lumachelliques au-dessus desquels reposent 120m de marnes admettant une intercalation d'un banc de calcaire à oolithes ferrugineuses.
- 200m de calcaires fins argileux, de calcaires oolithiques et de calcaires organogènes dans lesquels s'intercalent 50m de marnes.

L'ensemble de cette série reposant sur le Kimméridgien et contenant des Gastéropodes, des Lamellibranches et des Stromatopores a été attribué au Portlandien - Berriasien

II.1.3.2 Le néocomien

Le Néocomien affleure au Sud d'Ain El ibel au niveau du flanc nord ouest de l'anticlinal du Djebel Zerga où il est constitué par une série essentiellement gréseuse dans laquelle s'intercalent des calcaires à débris de Lamellibranches et de Gastéropodes, des dolomies, des calcaires gréseux et des marnes gréseuses versicolores. Cette formation d'une épaisseur de 330 m au Djebel Zerga a été datée grâce à présence de microfaune (*Trocholine elongata*).

II.1.3.3 Le barrémien

Les affleurements les plus importants du Barrémien sont localisés au niveau des flancs est et ouest du synclinal d'Ain El Ibel, dans les environs de Sidi Makhoul au Sud - Ouest et d'Ain El Ibel et Ksar Zeira au Nord - Est. Dans la partie centrale du secteur étudié le Barrémien est généralement recouvert en discordance par des formations quaternaires. Au point de vue lithostratigraphique la série barrémienne d'une épaisseur de 500m est constituée (Figure II.3) de la base au sommet par :

- De grès plus ou moins marneux sans dragées de quartz.
- De grès massifs à dragées de quartz.
- Une alternance de marnes, de grès fins et d'argiles rouges.
- Des grès massifs à dragées de quartz.
- une alternance de grès de marnes et d'argiles rouges.
- des grès rouges.
- des grès, des marnes bariolées à gypse.

II.1.3.4 L' aptien

Au niveau du secteur étudié l'Aptien daté grâce à la présence des Orbitolines affleure au Nord - Est d' Ain El Ibel , à Oued Seddeur et Draa et Ahmar où il est constitué de la base au sommet par :

- Des calcaires marneux lumachelliques à Orbitolines , Gastéropodes , Terébratules, lamellibranches et algues.
 - Des intercalations de marnes et de calcaires.
 - Des calcaires de couleur beige claire siliceux compacts à rognons de silex abondants.
- L'épaisseur de l'Aptien dans le synclinal d'Ain El Ibel est généralement faible, elle est comprise entre 30 et 40m.

II.1.3.5 L'albien

L' Albien affleure dans la partie occidentale du secteur étudié sur le flanc ouest d'une structure anticlinale où il est représenté essentiellement par (Figure II.4) :

- Une série argilo-gréseuse d'une épaisseur de 30 à 50m attribuée à l'Albien inférieur et constituée de grès fins et d'argiles ,de grès fins à moyens à stratifications obliques et par des intercalations de grès friables et de sables jaunâtres.
- Une formation argilo- carbonatée constituée de marnes jaunes de dolomies, de calcaires dolomitiques, de calcaires à Lamellibranches appartenant à l'Albien supérieur

II.1.3.6 Le quaternaire

Les formations quaternaires reposent en discordance sur les formations crétacées et couvrent une superficie importante au niveau du secteur étudié où elles sont représentées par :

- Des conglomérats à galets parfois ferruginisés, surmontés généralement par une croûte calcaire parsemée de galets (quaternaire ancien).
- Des dépôts conglomératiques souvent très hétérométriques cimentés par un calcaire blanc ou rosé, couverts par une croûte calcaire (Quaternaire moyen).
- Des limons et des galets (Quaternaire récent) occupant les zones déprimées.

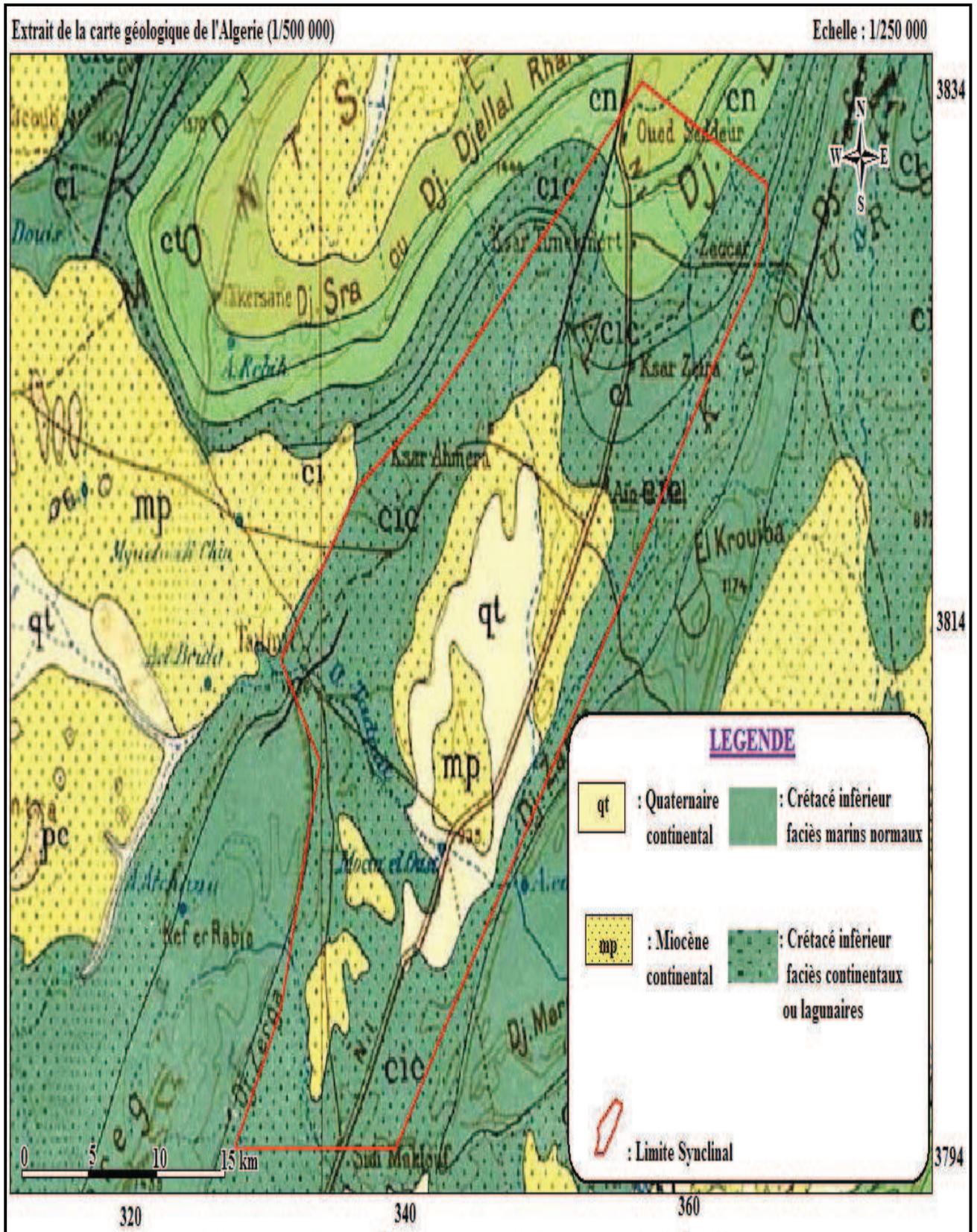


Figure II.2: Carte géologique de la zone étude (synclinal d'Ain EL Ibel-Sidi Makhlouf)

Figure II.3 : COUPE STRATIGRAPHIQUE LITHOLOGYQUE DE FORAGE EI Yourth (Ain El Ibel)

Figure II.4 : COUPE STRATIGRAPHIQUE LITHOLOGIQUE DE FORAGE KSAR ZEIRA

II.1.4 Analyse structurale

point de vue tectonique le secteur étudié appartenant à la dépression d'Ain EI lbel correspond dans sa majeure partie à une aire synclinale assez vaste comblée par des terrains détritiques barrémiens à pendages subhorizontal (5° à 10°) limitée à l'Est et à l'Ouest par les flancs des structures anticlinales étroites du Djebel E1 Azreg et du Djebel Zerga constituées par des formations jurassiques présentant des pendages de 30° à 60° .

Les failles s'observent essentiellement au niveau des anticlinaux du Djebel E1 Azreg et du Djebel Zerga où elles affectent les formations rigides jurassiques et présentent deux directions préférentielles

- Une direction nord est - sud ouest à rejet vertical, parallèle aux axes de plissements atlasiques.
- Une direction nord ouest - sud est perpendiculaire aux axes de plis à rejet horizontal, correspondant à des accidents de socle postérieurs à la phase de plissement atlasique.

II.1.5 Conclusion

L'étude lithostratigraphique et structurale montre que dans le secteur étudié les formations susceptibles d'être aquifères sont représentées essentiellement par :

- Les terrains gréseux du Néocomien dans lesquels s'intercalent des calcaires à débris, des calcaires et des dolomies.
- Les grès barrémiens à porosité d'interstices et de fractures et de chenaux dans lesquels s'intercalent des niveaux marno- gréseux parfois argileux.
- Le toit du Barrémien est généralement constitué par 50 à 60 m de marnes bariolées à gypse avec des passées gréseuses.
- Une série argilo-gréseuse d'une épaisseur de 30 à 50m à porosité d'interstices, de fractures et de chenaux, appartenant à l'Albien inférieur et constituée de grès fins et d'argiles, de grès fins à moyens à stratifications obliques et par des intercalations de grès friables et de sables jaunâtres.
- Une formation argilo- carbonatée à porosité de fractures constituée; de dolomies, de calcaires dolomitiques et de minces passées argileux, de calcaires à lamellibranches appartenant à l'Albien supérieur

II.2 Etude géophysique par prospection électrique

II.2.1 Généralité

L'étude géophysique a été effectuée dans le synclinal d'Ain El Ibel en février 2001 par la société EURL BERECH (Bureau d'Etude et de Réalisations en Génie civil et en Hydraulique).

La présente étude de géophysique par prospection électrique de la région d'Ain El Ibel (Wilaya de Djelfa) a été effectuée à la demande de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH Bir Mourad Rais , Alger) par la société BERECH , objet du marché n° 01/98 conclu entre les deux partenaires en vue de cerner les zones favorables pour l'implantation d'ouvrages de captage des eaux souterraines notamment au niveaux des formations susceptibles d'être aquifère

Elle a fait objet de 15 profils d'orientation NW-SE, perpendiculairement à la direction des plissements atlasiques et distants entre eux de 2 à 3 km, et de 2 profils longitudinaux séparés par une distance de 4 km parallèles à la direction des structures, notons que, notre étude s'est appuyée sur 5 profils essentiels.

La ligne d'émission choisie est de $AB=4000m$ et ce, dans le but d'atteindre le substratum marno- gréseux du Néocomien. Cette étude comporte 117 sondages électriques équidistants de 1 à 2 km (Figure II.5).

II.2.2 Objectif de l'étude

L'objectif de cette prospection électrique est :

- 1) De préciser la géométrie et la nature des terrains susceptibles d'être aquifères (formations gréseuses du Barrémien).
- 2) De déterminer les zones les plus favorables pour l'implantation des forages d'exploitation des eaux souterraines.

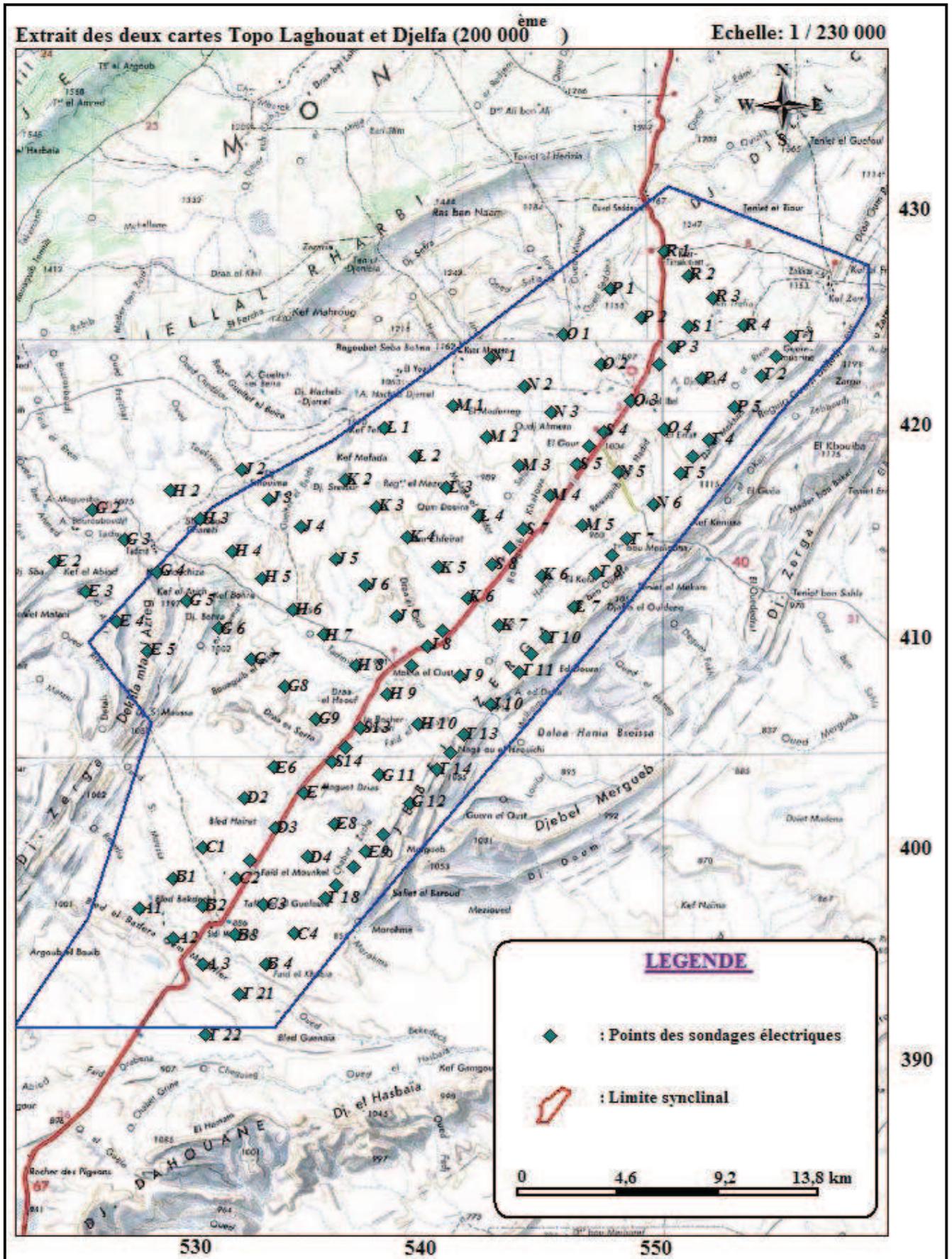


Figure II.5 : Carte de situation des sondages électrique

II.2.3 Interprétation des coupes géoélectriques

II.2.3.1 Les coupes géoélectriques (A et B)

Réalisées dans la partie méridionale du synclinal d'Ain El Ibel, montrent dans la partie occidentale au niveau des sondages électriques (A1, A2 et B1) une remontée par failles des calcaires massifs du Jurassique dont la résistivité est supérieure à 630 ohm m (Figure II.6).

Dans le secteur E des coupes, on constate un épaissement des terrains argilo-gréseux du Barrémien qui présentent une résistivité de 30 à 50 ohm m et une épaisseur maximale au sondage B4, et reposent sur les grès calcaires et les dolomies du Néocomien dont la résistivité est comprise entre 200 ohm m au sondage B4 et 230 ohm m au sondage B2.

II.2.3.2 La coupe géoélectrique (D)

Les formations du Barrémien présentent une épaisseur maximale de 760 m au sondage D3, deviennent plus conductrices aux D2 et D4 où la résistivité est de 40 à 60 ohm m et recouvrent les calcaires jurassiques (Figure II.8).

II.2.3.3 La coupe géoélectrique (G)

Le synclinal est affecté par un ensemble d'accidents tectoniques donnant une structure de Horsts (G8, G9) et Grabens (G10, G11) et où les formations argilo-gréseuses conductrices barrémiennes avec une résistivité de 30 à 50 ohm m, recouvrent soit:

- les calcaires, grès et dolomies du Néocomien dont la résistivité est comprise entre 100 et 260 ohm m.
- les terrains jurassiques d'une résistivité supérieure à 800 ohm m.

II.2.3.4 La coupe géoélectrique (J)

L'Horizon conducteur grès et argiles du Barrémien d'une résistivité de 20 à 70 ohm m qui surmonte les calcaires massifs du Portlandien - Berriasien, est couvert d'une faible croûte calcaire de 110 à 230 ohm m.

Du J7 au J10, on remarque une remontée des calcaires massifs du Portlandien Berriasien dont la résistivité est de plus de 430 ohm m.

LEGENDE

Coupes géoélectriques : profils A, B, D, O, K

Echelle horizontale : 1/25 000

Echelle verticale : 1 /10 000

FP : Forage proposé



Calcaires albiens



Grés et argile du barrémien



Calcaire jurassique

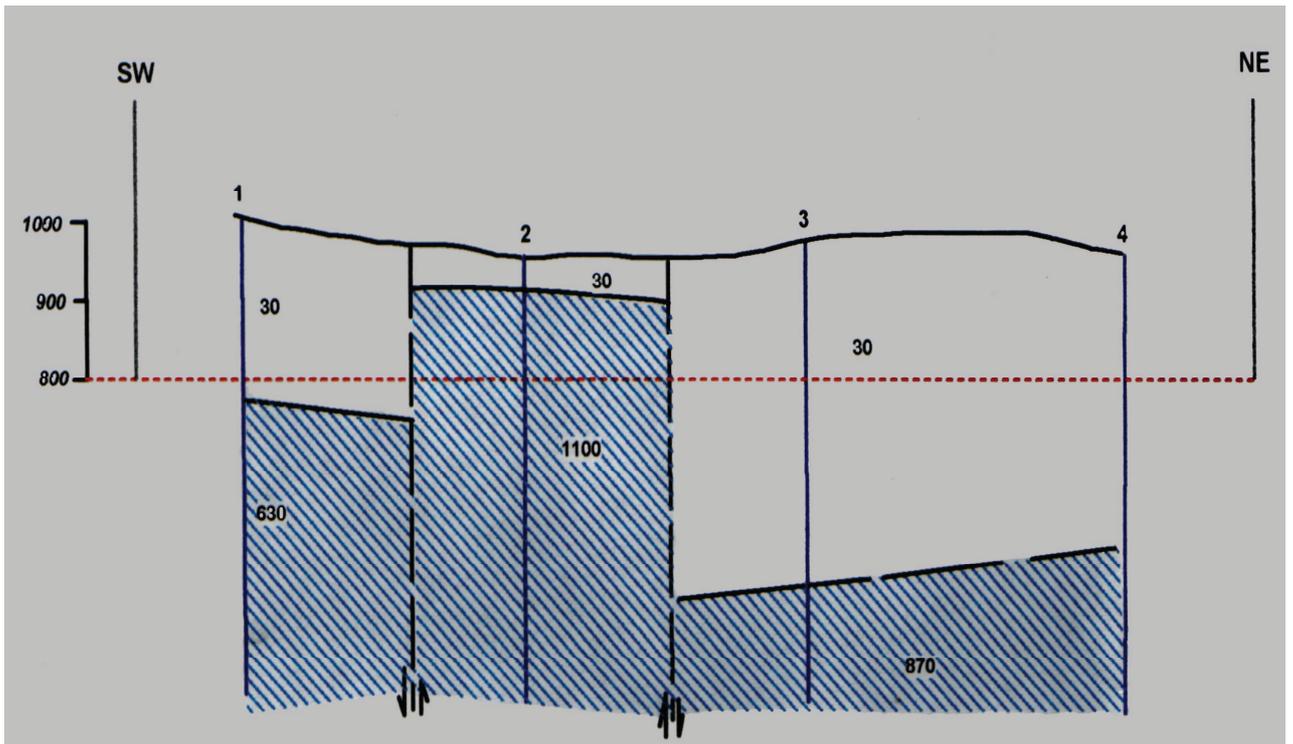


Figure II.6: Coupe géoélectrique profil A (EURL BEREGH-2001)

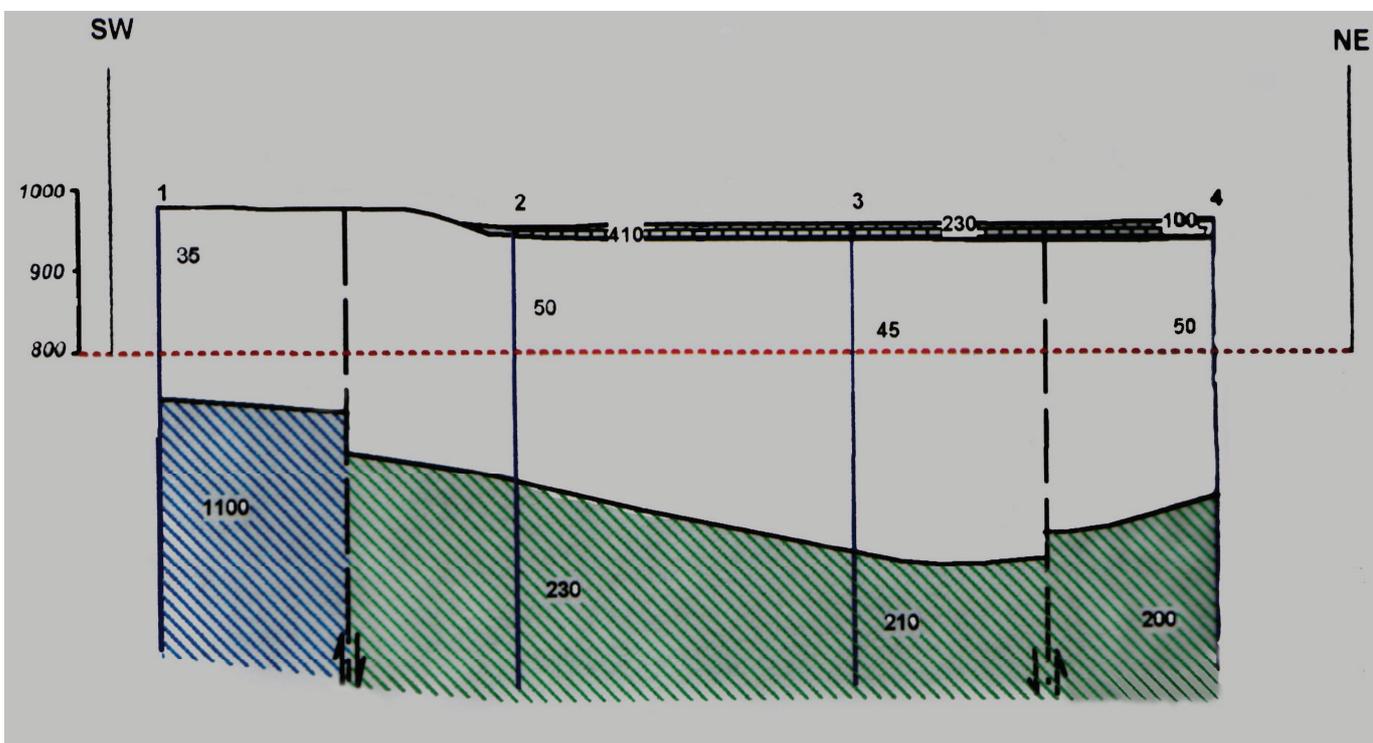


Figure II.7: Coupe géoélectrique profil B (EURL BEREGH-2001)

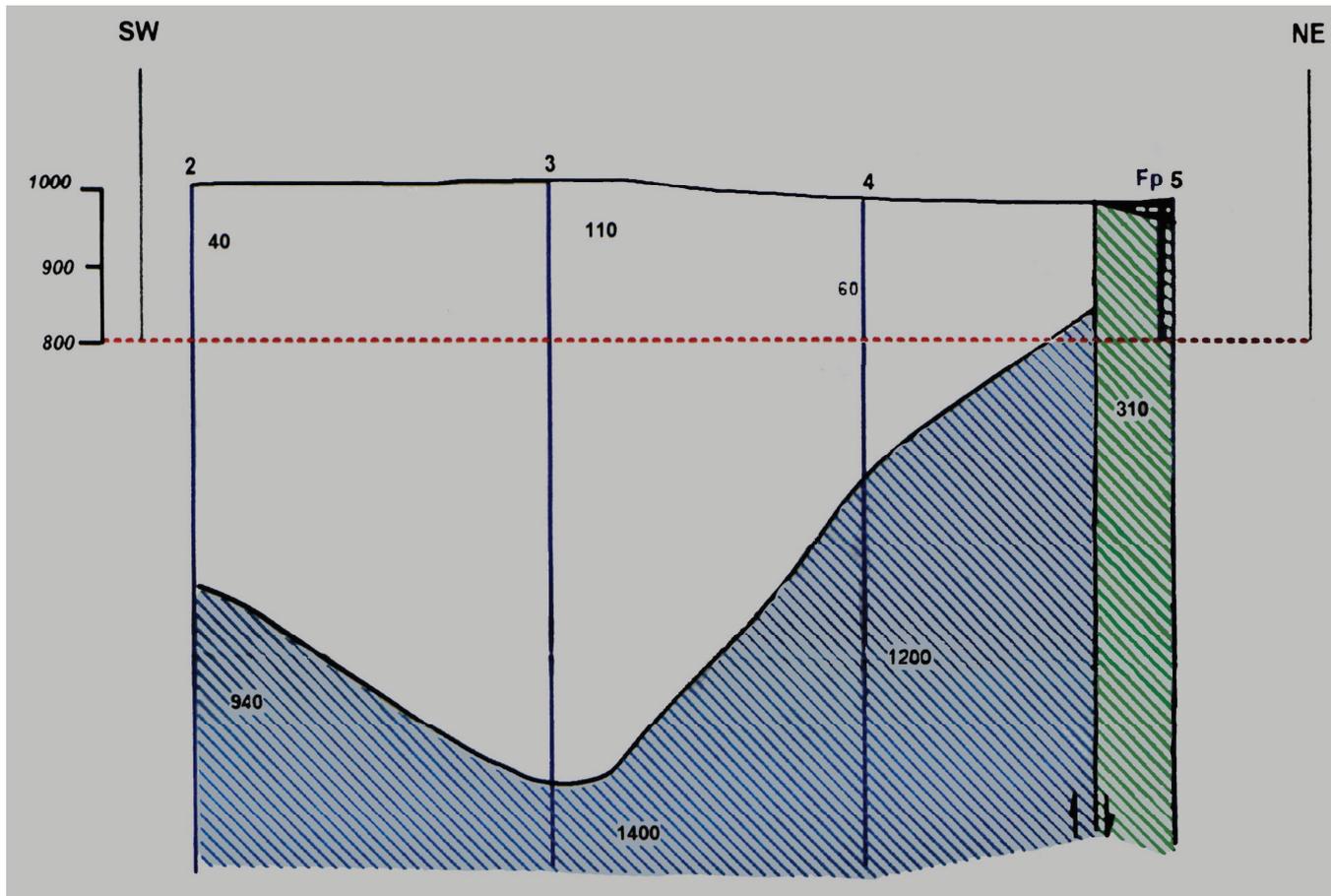


Figure II.8 : Coupe géoélectrique profil D (EURL BEREGH-2001)

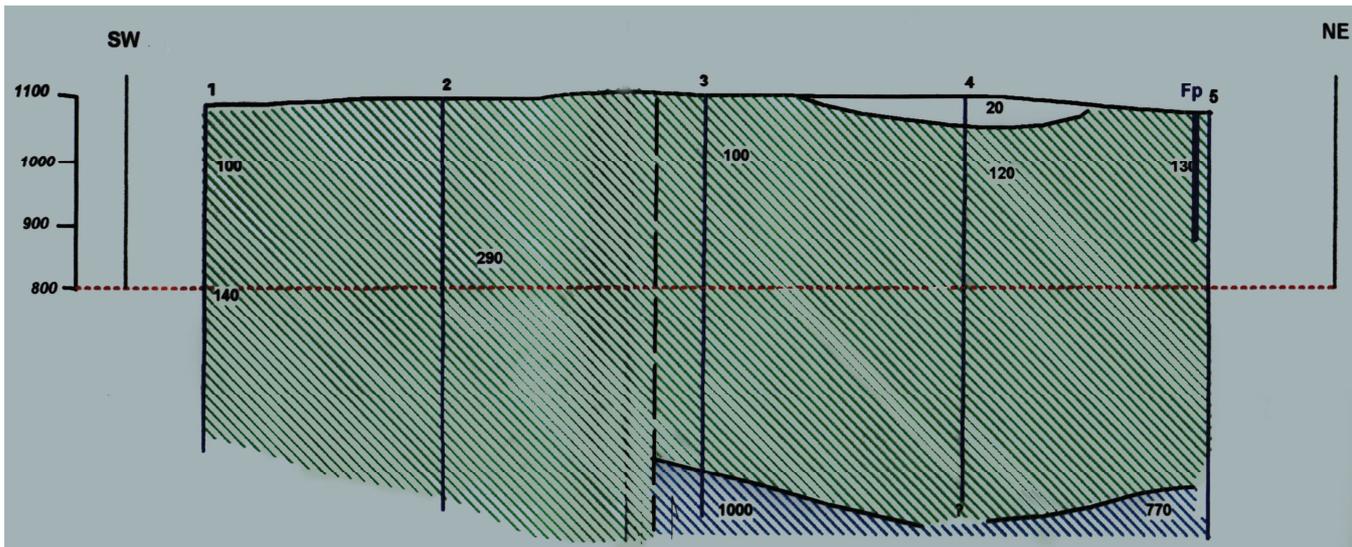


Figure II.9: Coupe géoélectrique profil O (EURL BEREGH-2001)

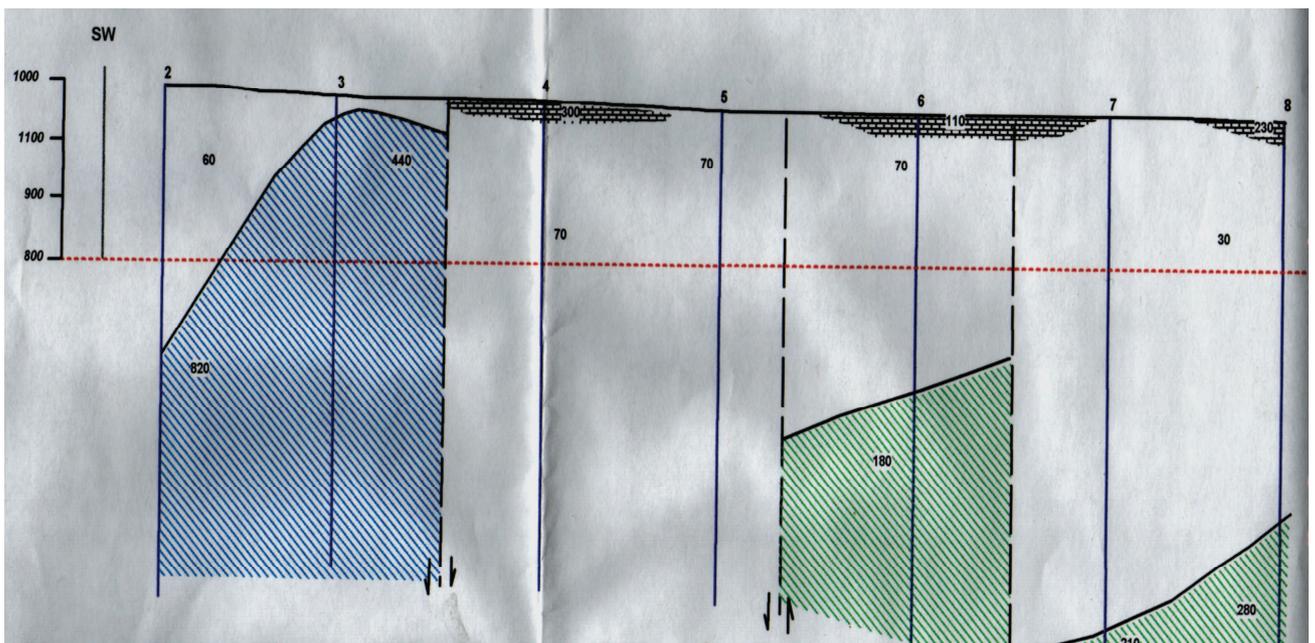


Figure II.10 : Coupe géoélectrique profil K (EURL BEREGH-2001)

II.2.3.5 La coupe géoélectrique (L)

Aux sondages L4, L5 une remontée des calcaires, grès et dolomies du Néocomien dont la résistivité est de 170 ohm m, par des accidents tectoniques profonds.

Les formations grés-argileuses du Barrémien prennent beaucoup plus d'importance et deviennent plus conductrices au niveau des extrémités de la coupe aux sondages L2, L3, L6, L7 où la résistivité est de 40 à 60 ohm m.

II.2.3.6 Les coupes géoélectriques (M et N)

Entre les sondages M2, M3, N2 et N3 la continuité de l'accident tectonique d'orientation SW-NE passant au niveau de l'axe anticlinal, et au Nord duquel le compartiment affaissé est constitué essentiellement par des formations peu résistantes d'une résistivité de 40 à 60 ohm m appartenant aux formations grés-argileuses du Barrémien sur lesquels reposent un horizon résistant d'une résistivité de 100 à 120 ohm m.

Le compartiment SE est représenté par des grès et argiles du Barrémien qui reposent sur les grès calcaires et dolomies du Néocomien dont la résistivité est de 100 à 160 ohm m.

II.2.3.7 La coupe géoélectrique (O)

Les Calcaires aptien et Grès barrémien qui surmontent :

- des calcaires, grès et dolomies du néocomien dont la résistivité est de 140 à 290 ohm m (aux sondages O1 et O2).
- des calcaires massifs du Jurassique (aux sondages O3, O4 et O5) (Figure II.9).

II.2.5 Carte du toit d u substratum :

La carte du toit du substratum du Barrémien montre que le substratum est le plus profond dans la partie centrale qui correspond à une structure synclinale et où la cote est comprise entre 400 et 800m. En ce qui concerne les côtes supérieures à 800m , le substratum du Barrémien est moins profond car il est localisé au niveau de structures anticlinales , où de horst qui remontent par l' intermédiaire d'accidents tectoniques profonds.

II.2.6 Conclusion :

L'étude géophysique réalisée dans le synclinal d'Ain El Ibel montre que les zones les plus favorables pour l'implantation des forages d'eau sont localisées au niveau :

- Du sondage électrique (D5), situé sur le flanc SE du synclinal d'Ain El Ibel où les formations résistantes, d'une résistivité de 310 ohms m, correspondant aux grès, dolomies et calcaires du Néocomien en contact anormal vers le NW avec des formations argilo-gréseuses plus conductrices, constituant une barrière aux écoulements des eaux.
- Du sondage (L4), situé sur le flanc NW du synclinal d'Ain El Ibel où les formations présentent une résistivité de 170 ohm m, correspondant à des grès aquifères du Barrémien et des grès calcaires et dolomies du Néocomien en contact anormal avec les formations grés- argileuses d'une résistivité de 40 à 60 ohm m du toit du Barrémien.
- Du sondage (O5), situé sur le flanc SE du synclinal d'Ain El Ibel où les formations présentent des résistivités de 100 à 130 ohm m et correspondent aux grès du Barrémien qui présentent à ce niveau une épaisseur importante.

III.1 Détermination des caractéristiques hydrogéologique

Dans la région d'Ain El Ibel l'exploitation des eaux souterraines a lieu principalement à partir des formations aquifères du Valangénien-Barrémien constituées essentiellement par une série gréseuse ou gréso-argileuse à porosité d'interstices, de fractures et de chenaux, recoupée sur une épaisseur de 403 m au F13 exploitée par un ensemble de forages (Tableau III.1), fournissant des débits intéressants particulièrement dans la partie centrale du synclinal d'Ain El Bel (**EURL BERECH.2001**).

L'aquifère du Valangénien-Barrémien correspond à une nappe libre sur les parties latérales du synclinal où il est représenté essentiellement par des grès (F9, F6, F3), et une nappe semi-captive dans la zone centrale (F13) où le toit du Barrémien devient plus argileux.

Tableau III.1: Inventaire des forages (synclinal d'Ain el Ibel)
(EURL BERECH-2001)

N°du Forage	Numérotation DHW	Coordonnées		NS(m)	Débits	T m ² /s	Profo (m)	Horizon Aquifere
		x	y					
F 1	Miriha F2	545.650	415.550	21	44	0,46.10 ⁻²	250	Barrémien
F2	Miriha F1	546.500	416.400	4	4	1,83.10 ⁻³	300	Barrémien
F3	Gorita 1	540.700	402.600	11.5	24.4	0,79.10 ⁻³	210	Barrémien
F4	UP 1	541.200	406.600	10.9	44	0,134.10 ⁻²	200	Barrémien
F5	U P2	541.400	405.800	18.7	12	0,31.10 ⁻³	200	Barrémien
F6	UP3	541.700	404.950	19.5	31.4	0,49.10 ⁻²	200	Barrémien
F7	F7	544.950	415.520	25.7	30	0,549.10 ⁻²	250	Barrémien
F8	F3	551.400	414.150	56.5	20		300	Barrémien
F9	F6	550.400	414.800	38.5	30	0,588.10 ⁻²	200	Barrémien
F10	Fours F 1	521.300	413.500	13.08	13.5	3,30.10 ⁻³	345	Barrémien
F11	Amra F 1	540.400	419.300	93.98	7	6,887.10 ⁻⁴	268	Barrémien
F12	Tadmit F1	529.000	408.500	30.2	4.5	6,176.10 ⁻⁴		Barrémien
F13	Ain El Ibel F2	548.800	415.750	3.0	54	2,502.10 ⁻³	403	Barrémien
F14	Ain Roumis	545.000	123.000		10		250	Barrémien
F15	KsarTimekmer	551.700	128.700	4.6			250	Barrémien
F17	OREVICE F1	552.100	121.450	24	18		200	Barrémien
F18	Ksar Zeira F2	551.800	122.400	2.8	24.4	0,305.10 ⁻²	250	Barrémien
F19	ZAKKAR F2	556.600	126.550	12.6	44	2,51.10 ⁻²	200	Barrémien
F21	Ksar Zeira F 1	551.650	123.400	7.14	49		250	Barrémien

PIII.2 Inventaire des points d'eau

Nous avons procédé dans cette partie à la reconnaissance et à l'inventaire des points d'eau dans notre secteur d'étude.

Alors, nous avons recensé 731 points (figure III.1) d'eau assez bien répartis, captant les formations du remplissage barrémien. Ces points d'eau sont en général des points et des forages utilisés pour l'irrigation des aires agricoles et pour l'AEP, et sont souvent équipés de motopompes.

III.2.1 La piézométrie

L'étude piézométrique s'est appuyée sur des données de campagnes piézométrique de mai 2002, ce qui va nous permettre de donner une idée sur l'évolution du niveau d'eau de la nappe du barrémien dans le temps.

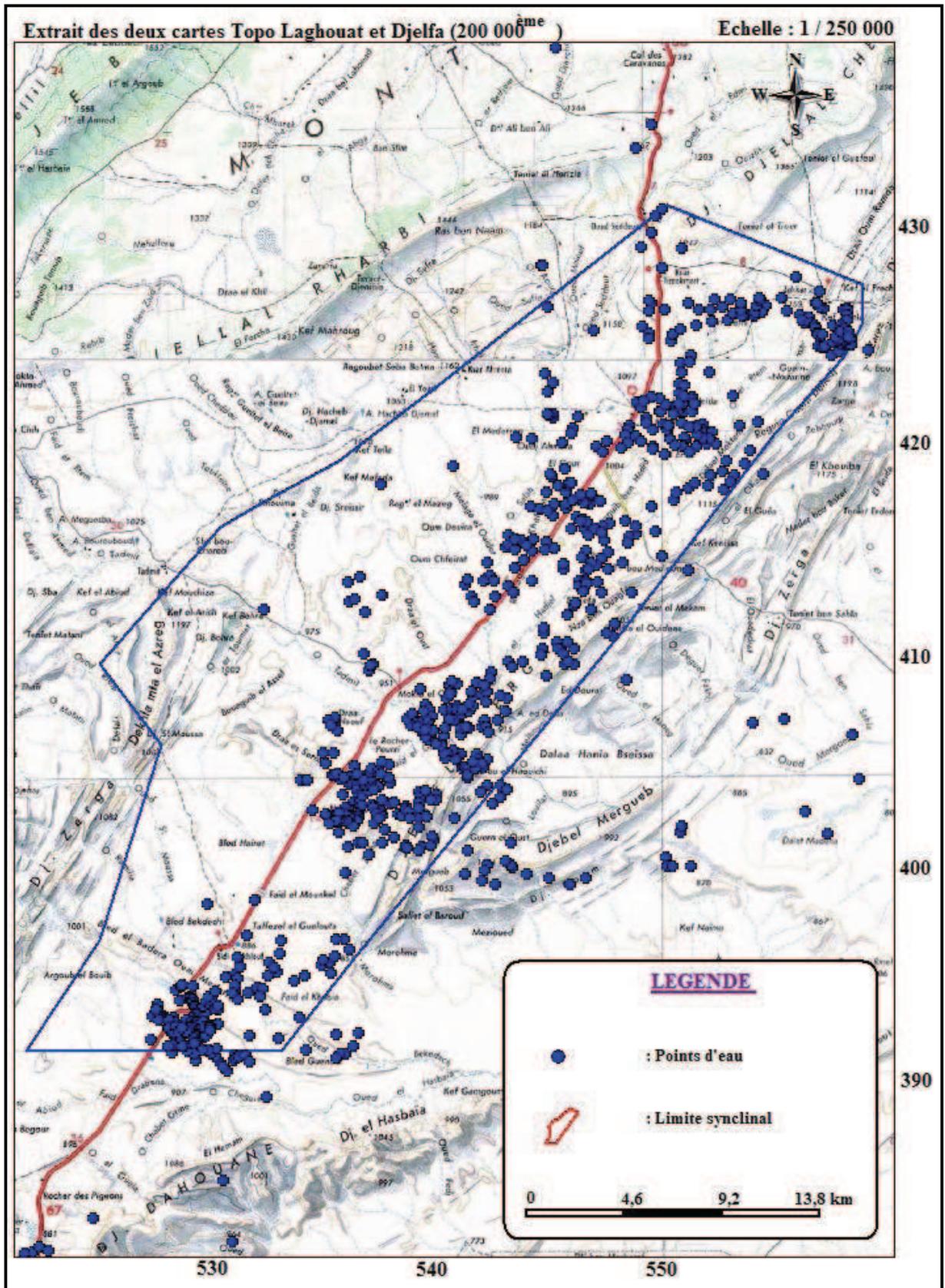


Figure III.2 : Carte d'inventaire des points d'eau de la zone d'étude

III.2.2 Elaboration de la carte piézométrique

L'inventaire de l'exutoire de la nappe étudiée permet de calculer leur niveau piézométrique. Les mesures doivent être effectuées, pour les puits et les sondages dans les conditions d'équilibre et pour l'ensemble des points d'eau de la même nappe et dans le laps de temps le plus court (1 à 2 jours).

Tous les points d'eau sont portés avec leurs côtes piézométriques sur carte en courbes de niveaux. On trace alors les courbes isopiezes en joignant les points d'égale altitude comme on repèrerait pour l'établissement d'une carte topo en courbe de niveaux (**Castany G. 1982**).

Sachant que, l'équidistance des courbes est choisie en fonction du gradient hydraulique, de l'échelle et de la densité des points d'observation (Figure III.3).

III.2.3 Interprétation de la carte en courbes isopiezes

Des cartes en isopiezes nous permettent de :

- calculer la profondeur de la surface piezométrique.
- tracer les lignes de courant et de déterminer la direction de l'écoulement.
- déterminer le gradient hydraulique.
- construire le profil de dépression.

L'interprétation du profil de dépressions qui conduit à des conclusions importantes sur les caractéristiques hydrologiques des couches aquifères et le rapport alimentation – drainage.

III.2.4 Le sens d'écoulement

En général la direction de l'écoulement, matérialisée par les lignes de courant, et la droite de plus grande pente tracée sur les courbes isopièzes donne la normale à ces dernières.

Dans notre cas, nous constatons que l'axe de drainage se fait de NE au SW, en conséquent le sens d'écoulement est de même direction, donc l'alimentation de la nappe par les formations semi-perméables du flanc sud du synclinal.

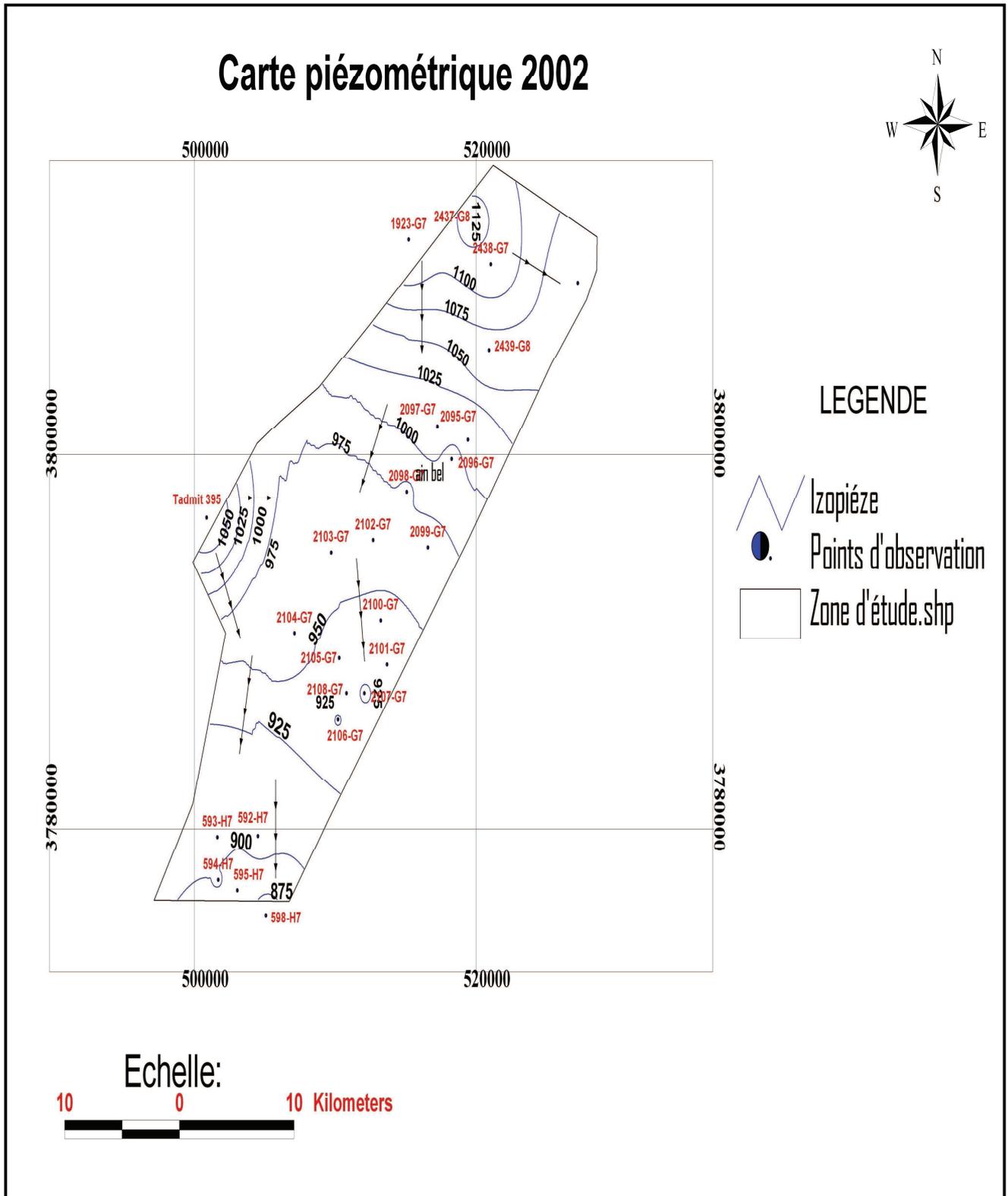


Figure III.3 : Carte piézométrique de synclinal d'Ain El Ibel - Sidi Makhoul (MAI 2002)

III.2.5 Le Gradient hydraulique

Le gradient hydraulique est calculé sur un profil tracé dans un plan vertical par une ligne de courant (ligne de plus grande pente), il est donné par la formule (**Lancastre A. 1996**) :

$$i = H_1 - H_2 / L \quad (\text{III-1})$$

i : le gradient hydraulique.

H_1 : l'altitude du point d'eau 1.

H_2 : l'altitude du point d'eau 2.

L : la distance entre les deux points 1 et 2.

Dans le nord du synclinal (Ain EL Ibel) on a :

$$\left. \begin{array}{l} H_1 = 990.65 \text{ m} \\ H_2 = 906.65 \text{ m} \\ L = 17.10^3 \text{ m} \end{array} \right\} \longrightarrow i_1 = 4.94. 10^{-3}$$

Dans le sud du synclinal (Sidi Makhlouf) on a

$$\left. \begin{array}{l} H_1 = 908.6 \text{ m} \\ H_2 = 874.45 \text{ m} \\ L = 4.10^3 \text{ m} \end{array} \right\} \longrightarrow i_2 = 8.53. 10^{-3}$$

III.2.6 Evolutions piézométriques

La carte piézométrique mai 2002 située en Figure III.3 montre les principales directions d'écoulement. L'écoulement se caractérise notamment par une alimentation en provenance des reliefs (affleurements de Barrémien).

Les évolutions piézométriques sont disponibles de 2002 à 2010 pour l'ensemble du réseau piézométrique suivi par l'ANRH de Djelfa, soit 25 piézomètres. 8 points de mesures peuvent être exploités dans le cadre de cette étude L'ensemble de ces piézomètres est implantés dans le Barrémien.

La carte présentée en Figure III.4 précise la localisation des points de mesures suivis par l'ANRH

Les évolutions piézométriques sont disponibles sur une période courte, de 2002 à 2010 et sont présentée dans les Figures III (5,6, 7, 8, 9, 10,11).

Tableau III.2 : Localisation des points de mesure piézométrique

Piézomètre	X	Y
2097-G7	545.658	417.209
2099-G7	544.845	410.705
2103-G7	536.409	410.423
2108-G7	537.031	401.492
592-H7	530.064	395.245
594-H7	526.614	392.863
2437-G8	548.728	128.557
2439-G8	550.144	121.847

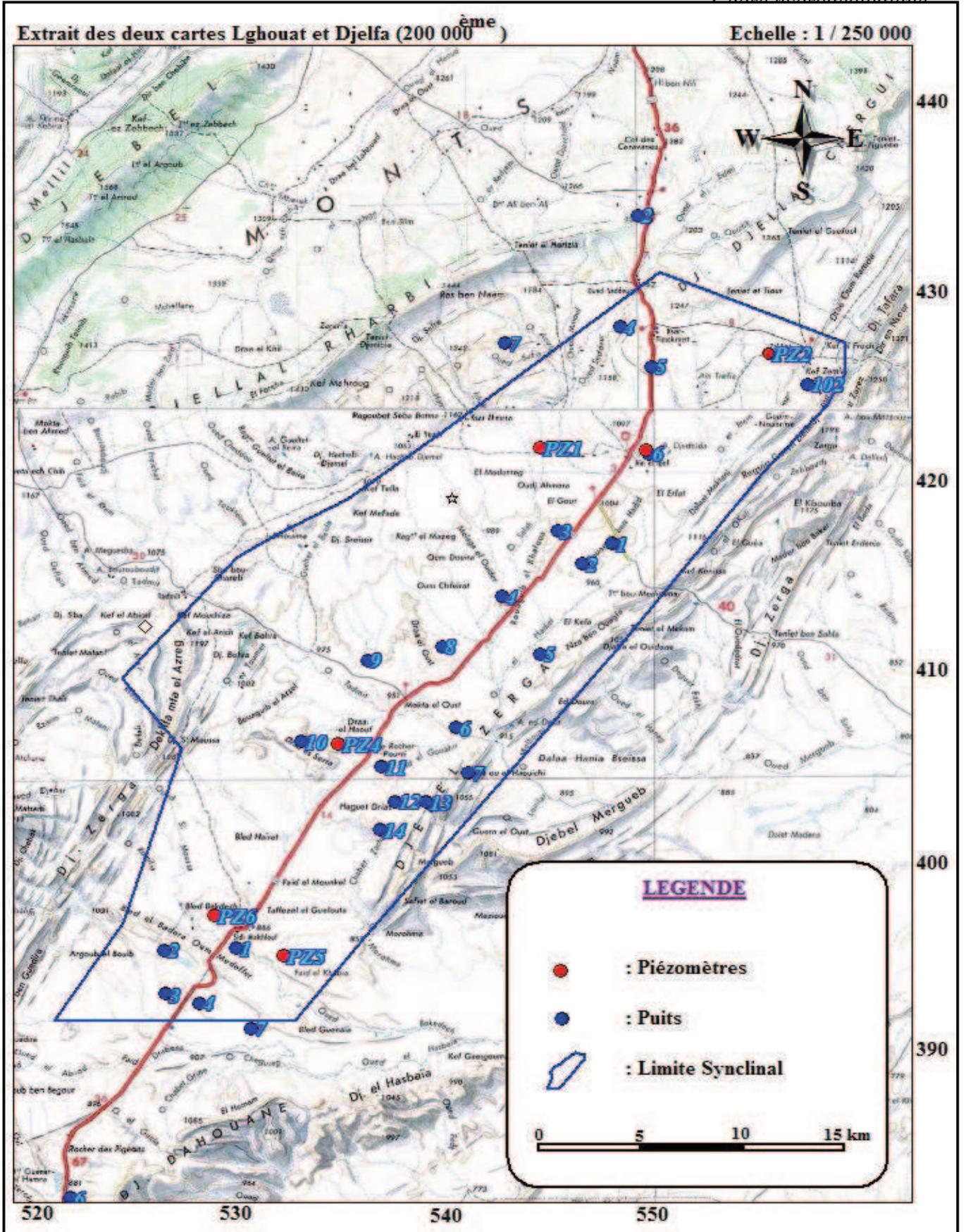


Figure III.4 : Carte de surveillance de réseau piézométrique Ain El Ibel -Sidi Makhlouf

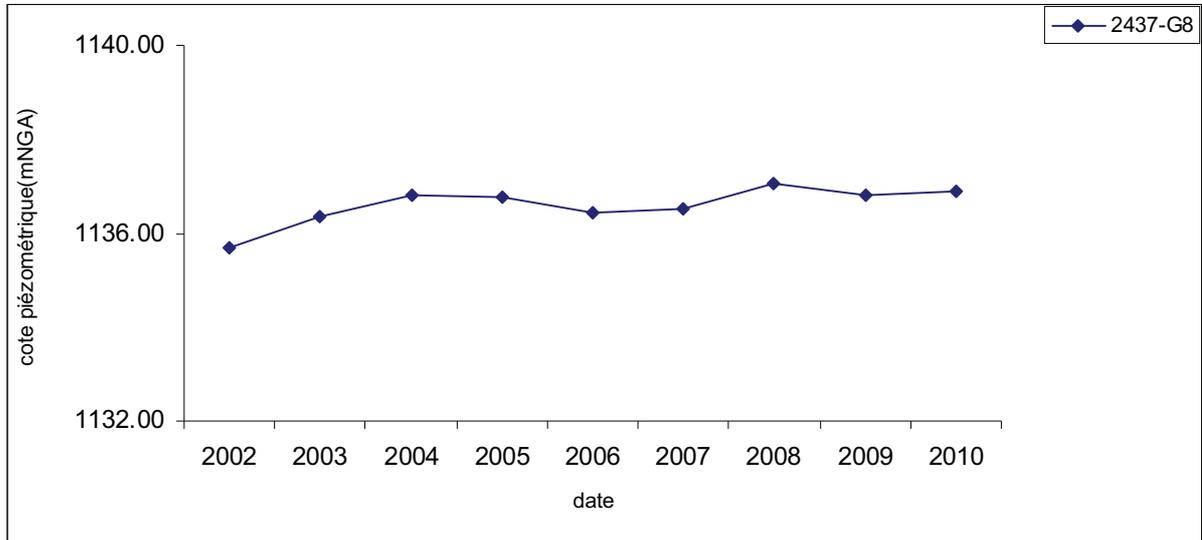


Figure III.5 : Variation du niveau piézométrique du puits 2437-G8 en fonction du temps

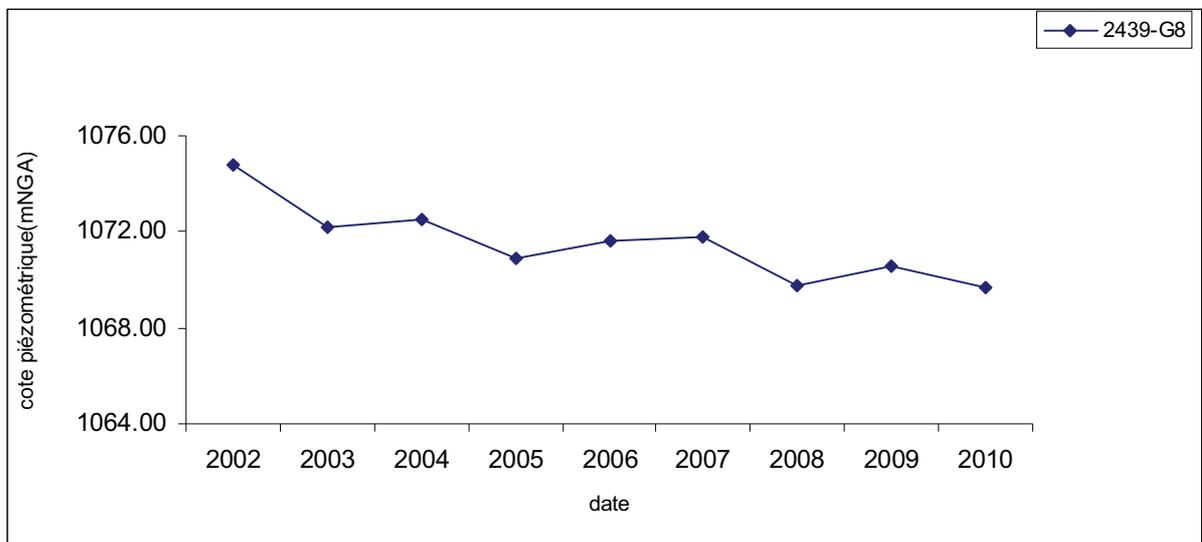


Figure III.6 : Variation du niveau piézométrique du puits 2439-G8 en fonction du temps

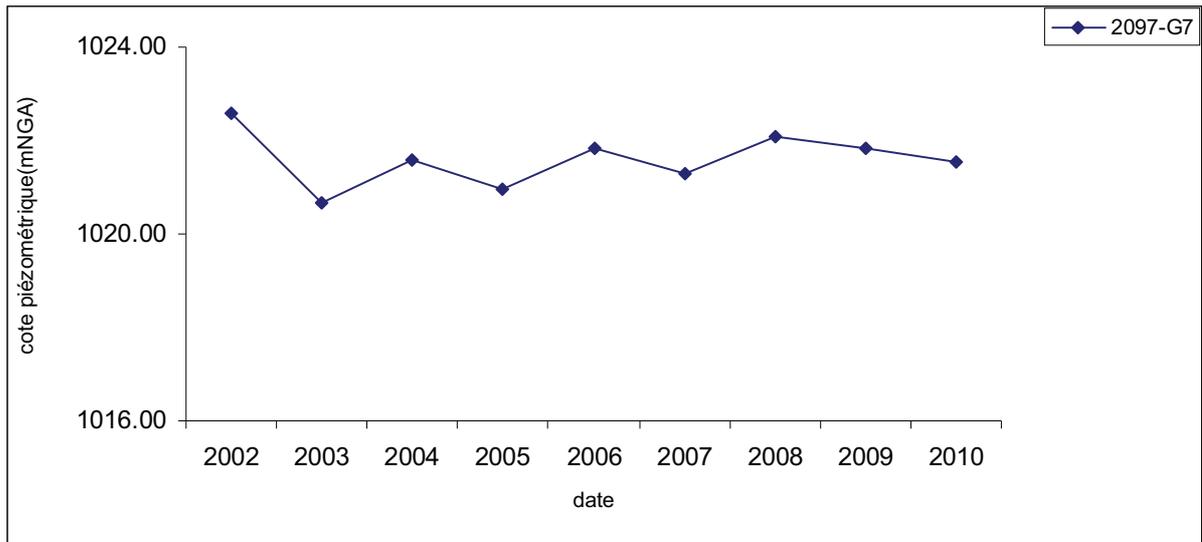


Figure III.7 : Variation du niveau piézométrique du puits 2097-G7 en fonction du temps

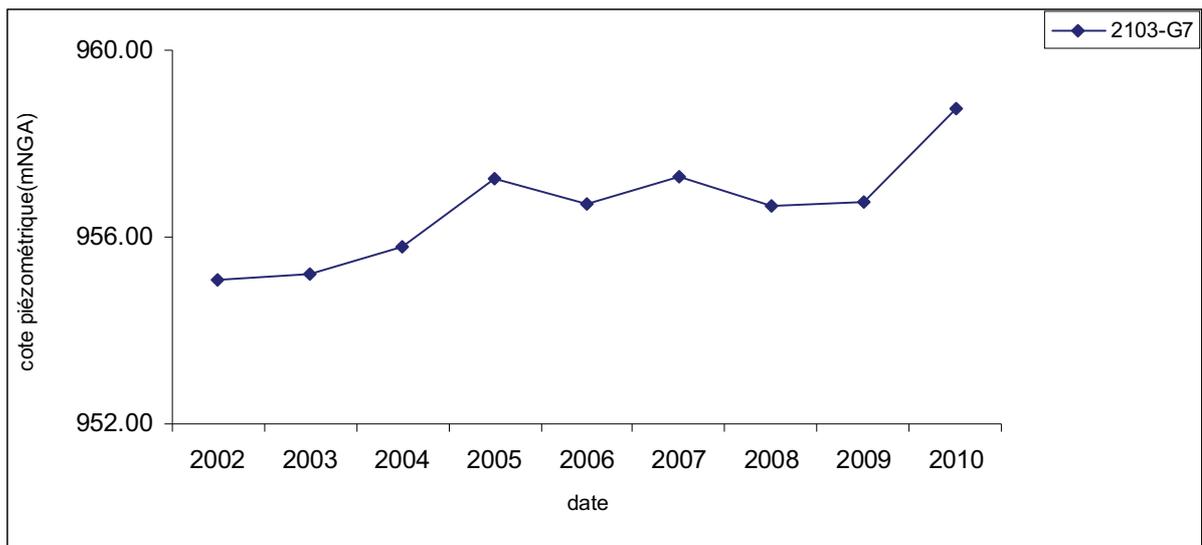


Figure III.8: Variation du niveau piézométrique du puits 2103-G7 en fonction du temps

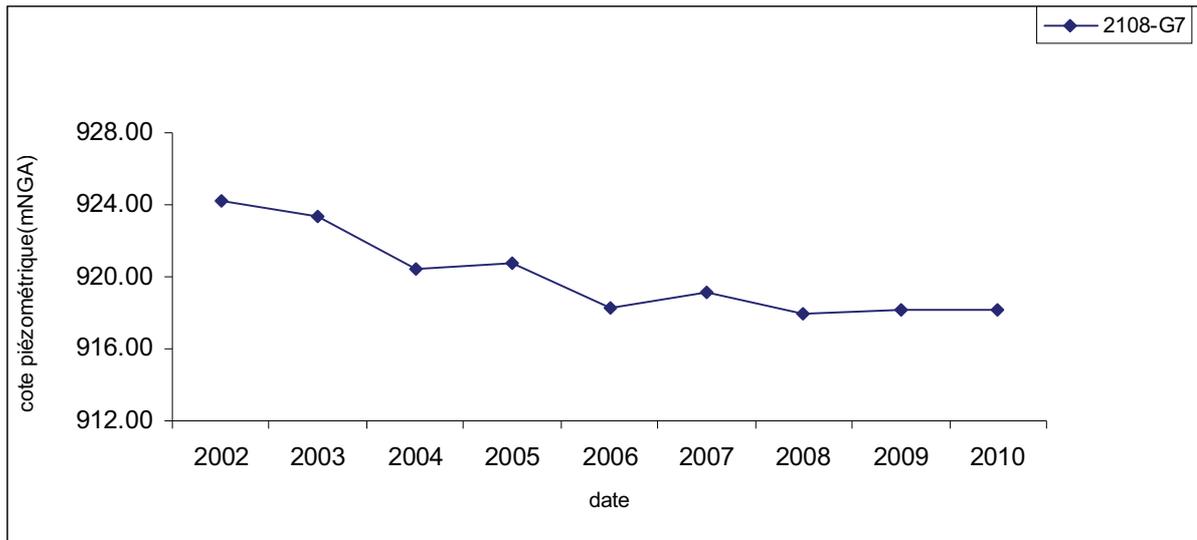


Figure III.8: Variation du niveau piézométrique du puits 2108-G7 en fonction du temps

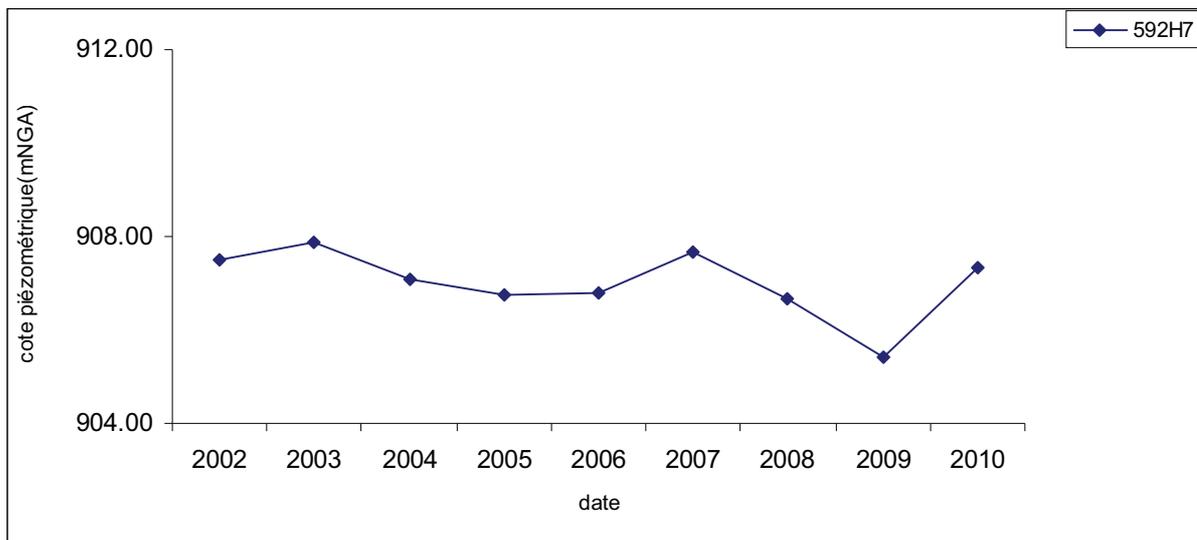


Figure III.9: Variation du niveau piézométrique du puits 592-H7 en fonction du temps

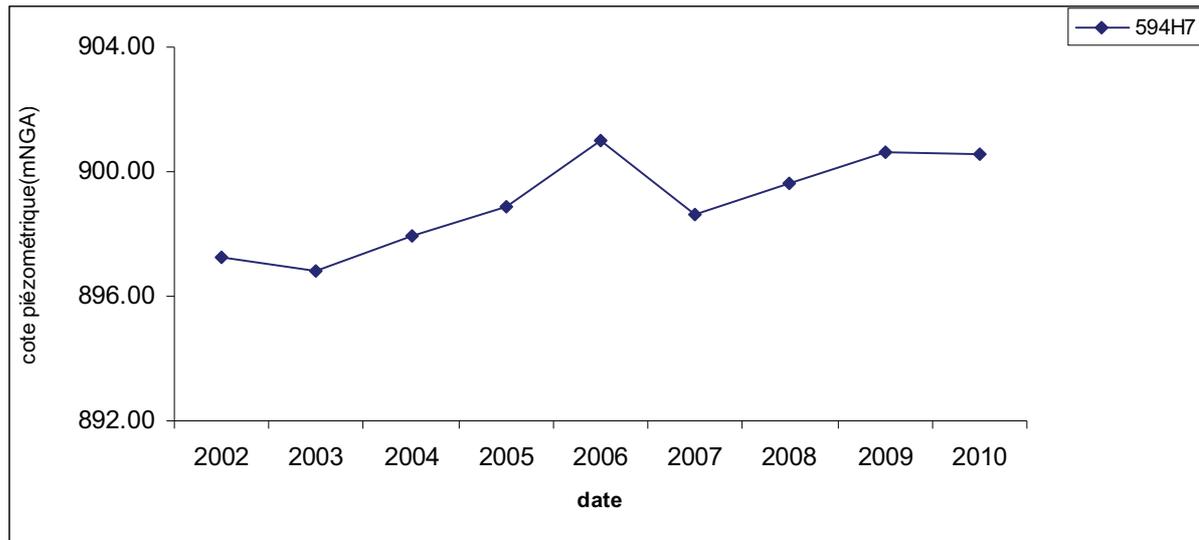


Figure III.10: Variation du niveau piézométrique du puits 594-H7 en fonction du temps

III.3 Les essais de pompage

III.3.1 Introduction

Dans cette partie notre étude portera sur l'interprétation de deux essais réalisés au niveau des formations aquifères nécessaires au N du synclinal.

Nous signalons que nous avons repris des études réalisées antérieurement par l'A.N.R.H de Djelfa.

Notons aussi qu'aucun essai n'a été réalisé depuis 1993. C'est pour cette raison que nous allons faire recours aux essais qui ont été suivis dans la région d'Ain El Ibel et Zekkar.

III.3.2 Méthode d'interprétation de C.E Jacob(1950)

La méthode de C.G Jacob suppose l'aquifère homogène, isotrope et d'extension latérale infinie, donc elle correspond à une approximation logarithmique de l'équation de Theis (Banton .O et Bangoy .L.1997)

Quand le temps de pompage devient suffisamment grand, par simplification, le développement en série converge de l'équation de Theis (1935) se réduit à la formule de C.G Jacob qui s'écrit :

$$\Delta = (0.183 Q / T) \times \log (2.25 Tt / r^2 s) \quad (\text{III-2})$$

Avec :

Δ : Rabattement en m.

T : transmissivité en m^2/s

Q : débit en m^3/s

r : distance entre le puits de pompage et le piézomètre d'observation en m.

s : coefficient d'emmagasinement.

t' : le temps depuis l'arrêt de pompage.

t : le temps depuis le début de pompage.

Alors, la résolution est basée sur l'interprétation des graphes $\Delta - \log t$ « Courbe descente » et $\Delta - \log t / t'$ « Courbe remontée ».

La transmissivité est donné par la formule suivante :

$$T = 0.183 Q / C \quad (\text{III-3})$$

Telle que : C = la pente des droites $\Delta - \log t$ et $\Delta - \log t / t'$. Calculée pour un cycle logarithmique de temps.

III.3.3 Interprétation des essais de pompage

En vu d'alimenter les villes d'Ain El Ibel et Zekkar en eau potable, des forages d'exploitation ont été réalisés par la direction de l'hydraulique de la wilaya de DJELFA.

III.3.3.1 Le forage de Ain El Ibel F1 (forage AMRA)

Dans cette zone les formations du Quaternaire et le Barrémien sont les plus répondues (Figure III.11). de point de vue tectonique, existe une faille dans le Barrémien avec une direction NS – SW.

III.3.3.1.1 Description géologique

Le forage réalisé nous a renseignés de la nature des terrains traversés, du haut vers le bas nous avons :

- De 0 à 4 m on a Sol Sableux.
- De 4 à 82 m on a Grès fins.
- De 82 à 84 m on a Argile marneuses.
- De 84 à 94 m on a Grès fins.
- De 94 à 117 m on a Argile marneuses.
- De 117 à 125 m on a Grès avec passage de marnes.
- De 125 à 191 m on a Grès.
- De 191 à 200 m on a Marnes avec peu de sable.

- De 200 à 206 m on a Grès.
- De 206 à 258 m on a Marnes avec peut de sable.
- De 258 à 268 m on a Marnes.

III.3.3.1.2 Description des travaux

L'exécution du forage a été réalisée, avec un appareil ss35 au Rotary à la boue jusqu'à 268 m de profondeur, il a été foré comme suit :

- De 0 à 10 m forages en Φ 26.
- De 10 à 135 m forage en Φ 17 ½.
- De 135 à 368 m forage en Φ 12 ¼.

Dans la mise en place du massif de gravier additionnel entre 20 et 258 m, les essais de développement ont été réalisés à l'air lift à l'aide d'un compresseur jusqu'à l'observation d'une eau claire, une cimentation s'en est suivie de 20 à 0 mètre.

III.3.3.1.3 Les essais de débit

Les essais de débit ont été réalisés par la société Afrique-Forage au moyen de pompes immergées avec le niveau d'aspiration à 114 m pour le premier et deuxième palier, et pour troisième palier à 120 m. l'essai à 3 paliers a été réalisé du 18H00 à 14H00 (après 8 jours) . Les résultats obtenus sont les suivants :

Niveau statique N.S = 93.98 m.

Tableau III.3: Résultat des essais de débit

Palier	Durée de pompage	Débit (l/s)	N . D (m)	Rabatement (m)
1 ^{er}	24 heures	3.91	105.14	10.19
2 ^{ème}	24 heures	5	108.85	14.87
3 ^{ème}	24 heures	7	114.43	20.45

III.3.3.1.4 Essais définitif

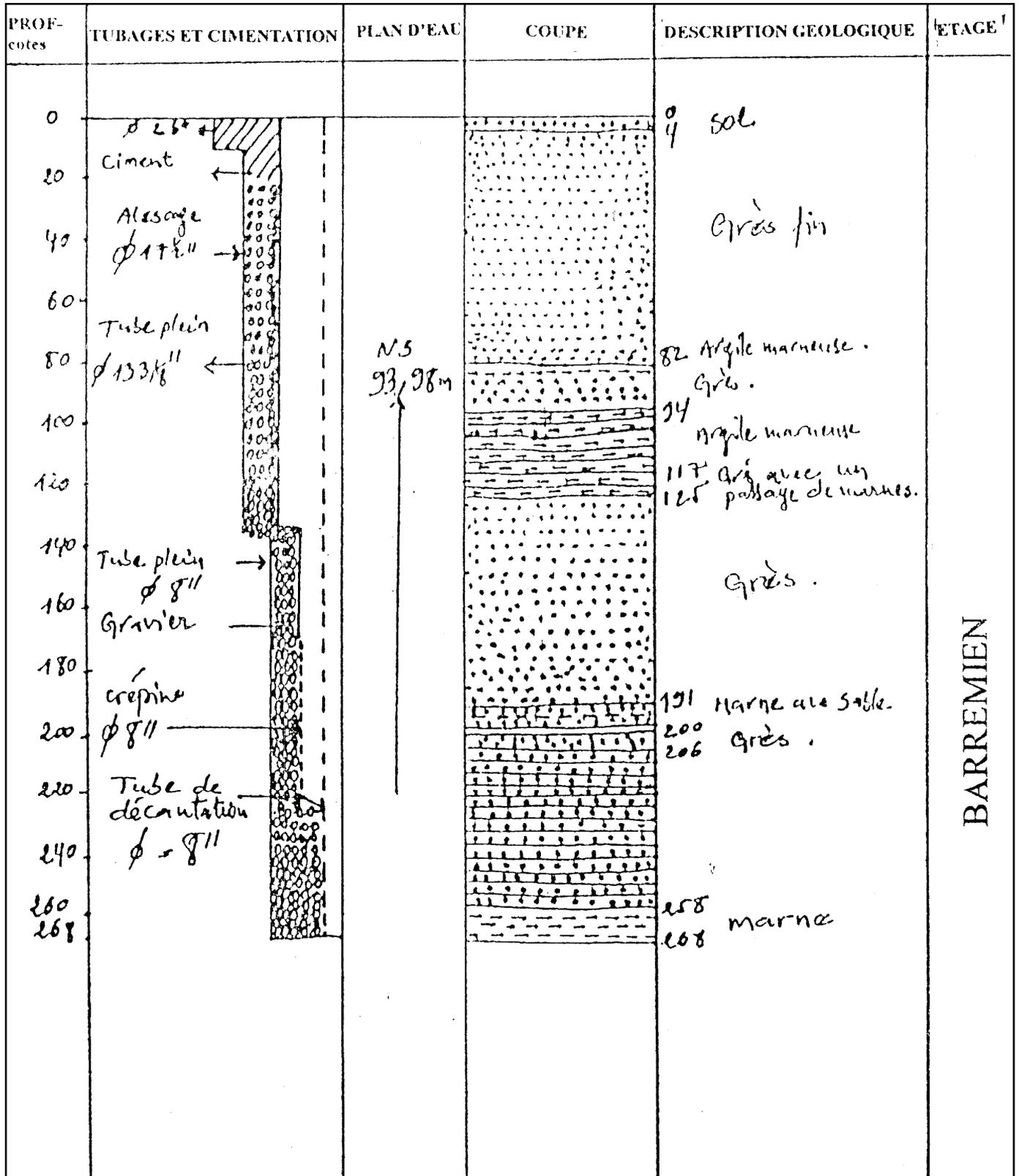
Ces essais ont été réalisés avec la même pompe pour fixer le débit d'exploitation et pour calculer la transmissivité de notre nappe dans la périphérie du forage.

Forage: AMARA

X = 540.000

Y = 419.300

Carte: AIN EL IBEL 1/50 000



BARREMIEN

Figure III.11: Coupe lithologique de forage Amra (F1) (ANRH)

Le pompage a commencé à 13H00'. Au 13H00' (après 2 jours), la remontée a été enregistrée pendant 18heures, les résultats sont comme suit :

- Débit $Q = 7$ l/s.
- Niveau dynamique N.D = 114.67 m.
- Rabattement $\Delta = 20.69$ m.

III.3.3.1.5 La Courbe caractéristique

Notre courbe caractéristique nous permet de pouvoir estimer un débit critique qui serait de l'ordre de 5 l/s (Figure III.12).

Remarquons que le dernier point de la courbe correspondrait soit à une mesure incorrecte ou à l'apparition d'un développement au cours du pompage.

III.3.3.1.6 Détermination des pertes de charge

D'après Jacob la formule du rabattement total mesuré au cours d'un pompage peut s'exprimer par :

$$\Delta = B Q + C Q^2 \quad \text{(III-4)}$$

Sachant que :

BQ : comprend les pertes de charge linéaires provoquées par l'écoulement laminaire dans l'aquifère au voisinage du puits.

CQ² : désigne les pertes de charge quadratiques, qui sont des caractéristiques de l'équipement technique de l'ouvrage (crépine, tubage,etc.).

Les résultats obtenus sont les suivants (Figure III.12) :

$$BQ = 15.82 \text{ et } CQ^2 = 4.97 \quad \text{qui donne } \Delta = 20.77 \text{ m}$$

III.3.3.1.7 Détermination de la Transmissivité T

Ce paramètre a été calculé par la formule d'approximation logarithmique de Jacob, qui a pour expression :

$$\Delta = (0.183 Q / T)x \log (2.25 Tt / r^2s)$$

Avec :

Δ : Rabattement en m.

T : Transmissivité en m³ /s.

Q : Débit en m³ /s.

t : Temps de pompage en s.

r : Distance du piézomètre à l'axe du puits de pompage en m.

s : Coefficient d'emmagasinement.

on obtient :

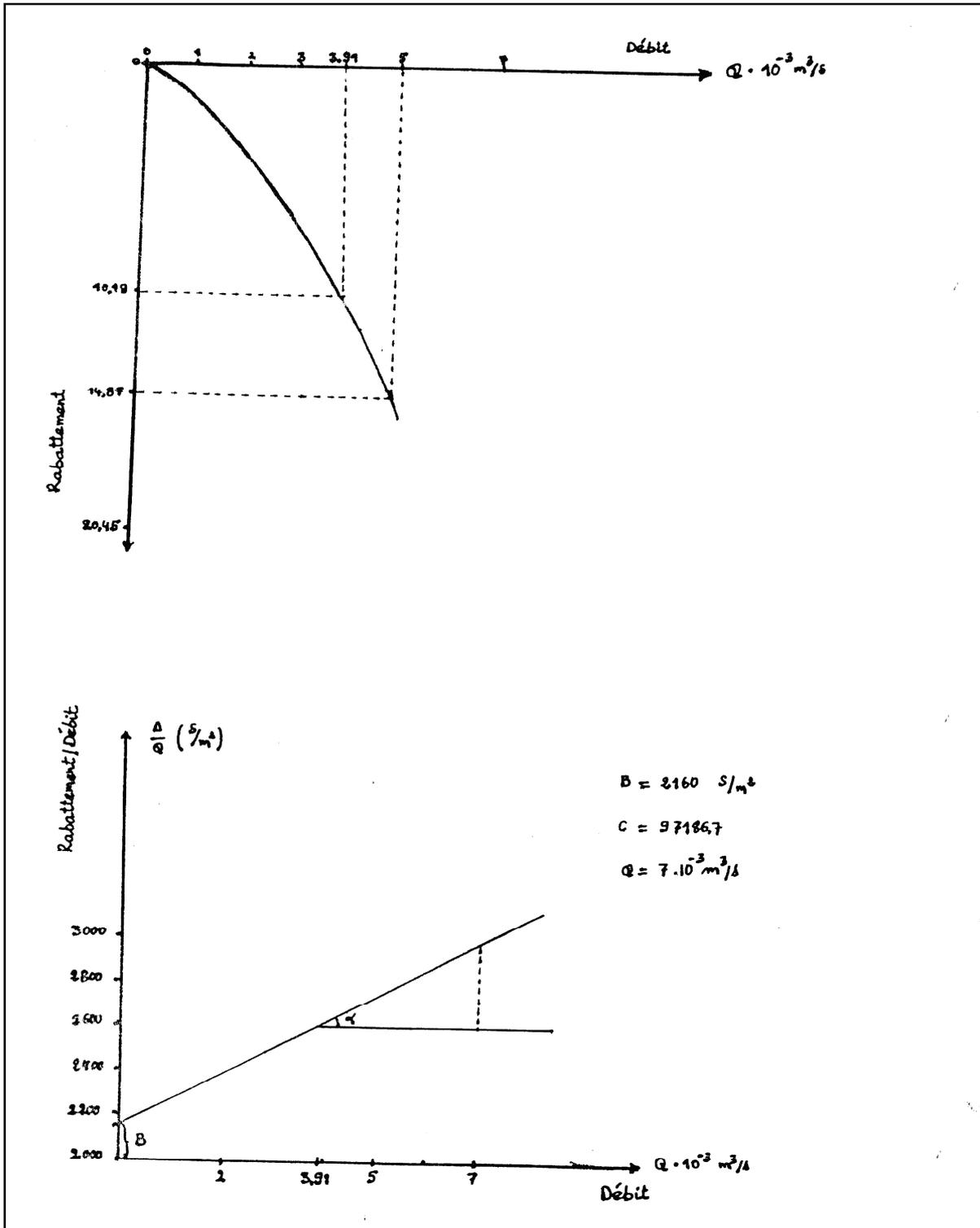


Figure III.12: courbe caractéristique et droite de perte de la charge de forage AMRA (F1)

III.3.3.1.8 La courbe de descente

La courbe de descente est présentée dans la Figure III.13.

$$T = 0183 \times Q / C, \text{ avec application numérique on aura : } T = 6.85. 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

Et $K = T / e$ et e : L'épaisseur mouillée de l'aquifère qui est de l'ordre de 98 m.

Donc :

$$K = 1.28. 10^{-3} / 98 = 6.9. 10^{-6} \text{ m/s.}$$

III.3.3.1.9 la courbe de remontée

La courbe de remontée est présentée dans la Figure III.14.

$$T = 0183 \times Q / C, \text{ avec application numérique on aura : } T = 1.28. 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Et } K = 1.28. 10^{-4} / 98 = 1.3. 10^{-6} \text{ m/s.}$$

III.3.3.1.10 Interprétation de la courbe de descente

La courbe de rabattements et temps du pompage a été tracée sur le papier semi-logarithmique, les points représentatifs du rabattement d'eau et ce pendant les 12 premières minutes, en suite les points s'alignent suivant une droite qui nous permet de calculer la Transmissivité aux alentours du forage, qui est de : $T = 6.85. 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

III.3.3.1.11 Interprétation de la courbe de remontée

Cette courbe nous montre une rapide récupération dans les 10 premières minutes, après ce temps les points représentatifs du rabattement résiduel s'alignent suivant une droite qui nous permet, elle aussi de calculer la Transmissivité $1.28. 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

Conclusion

Pour le forage F1 de l'Amra, le débit sera de 7 l/s avec une pompe installée à 120m. Si l'eau du forage est claire, son utilisation pour l'AEP de ce village restera tributaire des résultats d'analyses chimique et bactériologique.

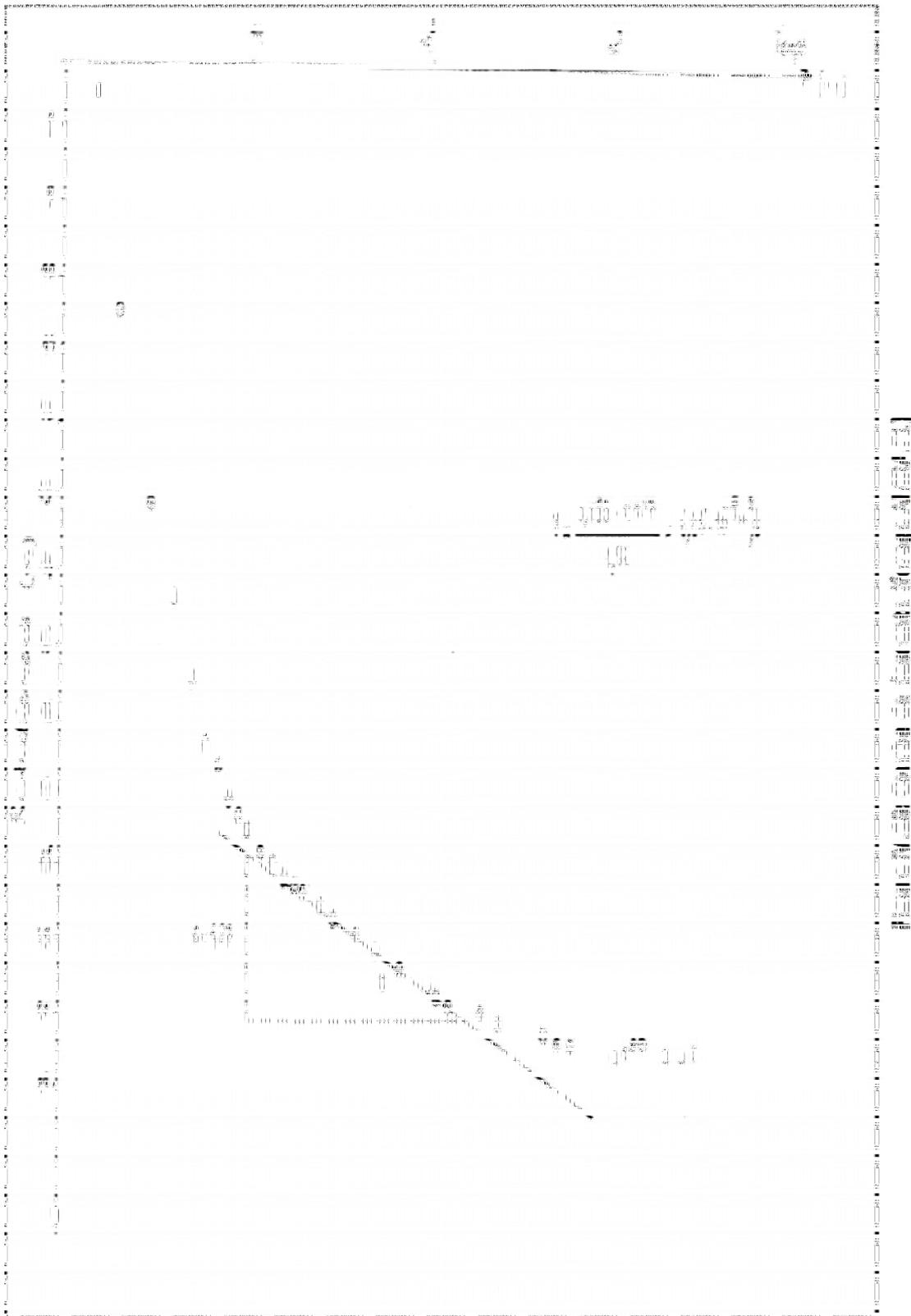
III.3.3.2 le forage F2 Ain El Ibel

Ce forage a été prévu pour exploiter les nappes aquifères contenues dans les grès du Barrémien.

Position géographique du forage : ce forage est situé à 1.5 km au SE de la localité d'Ain El Bel, au point de coordonnées (carte Ain El Bel au 1/50.000) :

$$X = 548.800.$$

$$Y = 415.750$$



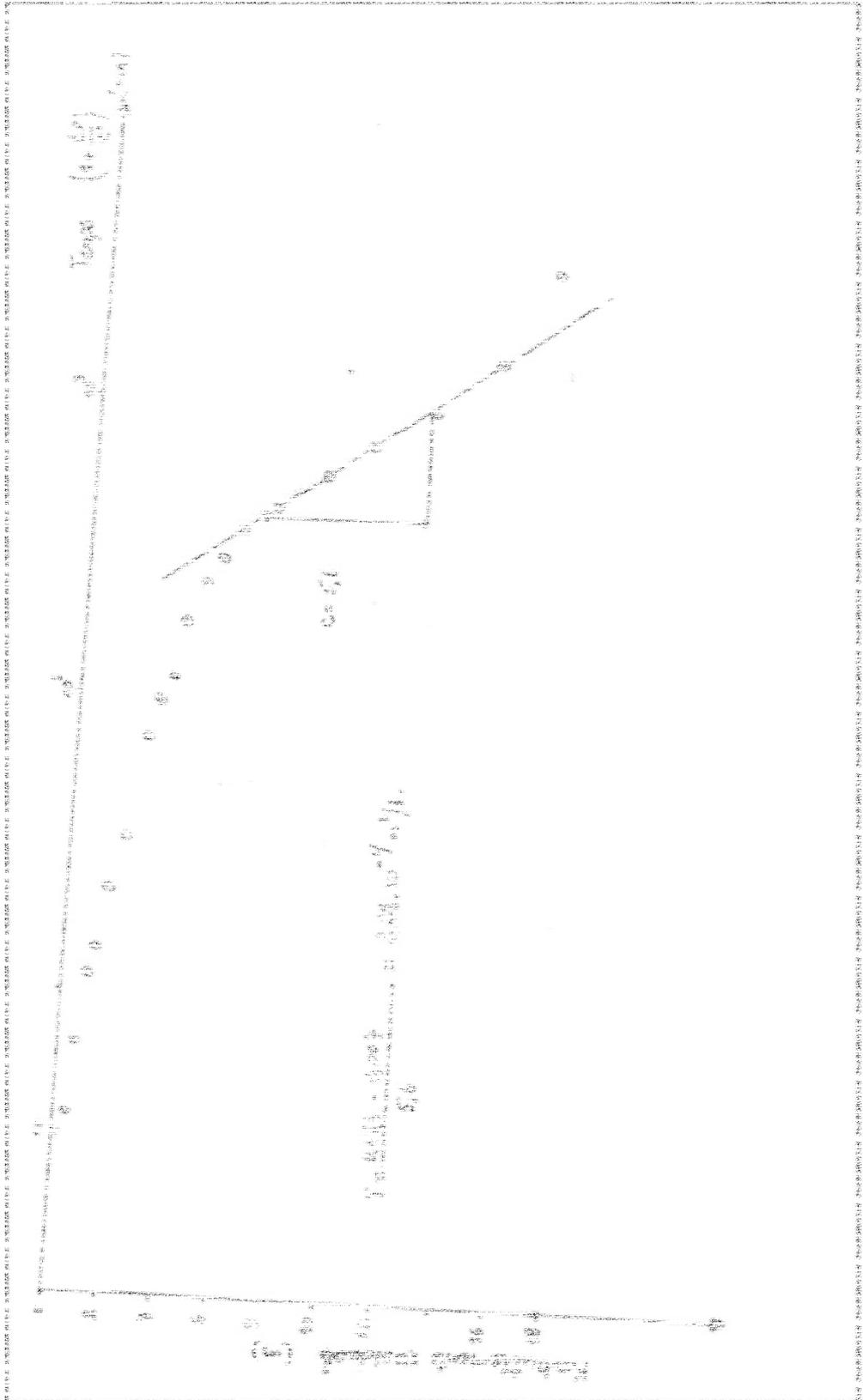


Figure 1: Schéma d'un puits dans un aquifère à écoulement laminaire.

III.3.3.2.1 Description des travaux

Ce forage a été réalisé avec un appareil ss35 au rotary à la boue, jusqu'à 403 m de profondeur, il a été foré comme suit :

- De 0 à 20 m forages en Φ 24.
- De 20 à 268 m forage en Φ 17 ½.
- De 268 à 403 m forage en Φ 12 ¼.

III.3.3.2.2 Description géologique

Les terrains traversés par ce forage sont représentés dans le Figure III.15.

Dans l'espace annulaire, entre les parois du forage et la colonne de captage, un massif du gravier a été mis en place. Les essais de développement ont été réalisés à l'air lift, à l'aide d'un compresseur jusqu'à l'obtention d'une eau claire (sans sable).

III.3.3.2.3 Essais de débit

Les essais de débit ont été réalisés en deux paliers au moyen de pompes immergées.

-pour le 1er palier, le pompage a duré 24 heures et la remontée a été enregistrée pendant 15 heures.

- pour le 2ème palier, le pompage a duré 37 heures et la remontée a été enregistrée pendant 41 heures, et les résultats obtenus sont comme suit :

1er palier : ND : 20.40m, Δ : 15.50 m, Q : 40.00 l/s.

2ème palier : ND : 33.04m, Δ : 30.04 m, Q : 54.00 l/s.

III.3.3.2.4 Interprétation de la courbe de descente

On remarque que lors du 1er palier, les points correspondants au niveau d'eau se caractérisent par un fort rabattement de 11.49m pendant une durée de 50 minutes, en suite, les points s'alignent jusqu'à 80 minutes, le segment de droite obtenu permet de calculer une Transmissivité qui est :

$$T1 = 6.21 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Après 100 minutes, on observe un décrochement, d'autres points viennent s'aligner jusqu'à ce que le niveau dynamique se stabilise.

Cette deuxième droite représente une diminution de la transmissivité à une certaine distance du forage. Alors la transmissivité calculée sur cette droite représente presque la moitié du premier (T1),

$$T2 = \frac{1}{2} T1, \text{ donc } T2 = 2.8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Pendant le deuxième palier, les points représentatifs du niveau d'eau se caractérisent par un fort rabattement (25.91 m) pendant une durée de 5 minutes (début). En suite, les points s'alignent jusqu'à 200 minutes. La transmissivité calculée à partir du segment de droite obtenu est de :

$$T1 = 1.09.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Après 200 minutes, on observe un décrochement, d'autres points viennent s'aligner jusqu'à ce que le niveau dynamique se stabilise. La transmissivité calculée sur la droite est de $\frac{1}{4}$ de T1.

$$T2 = \frac{1}{4} T1, \text{ donc } T2 = 2.82. 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}.$$

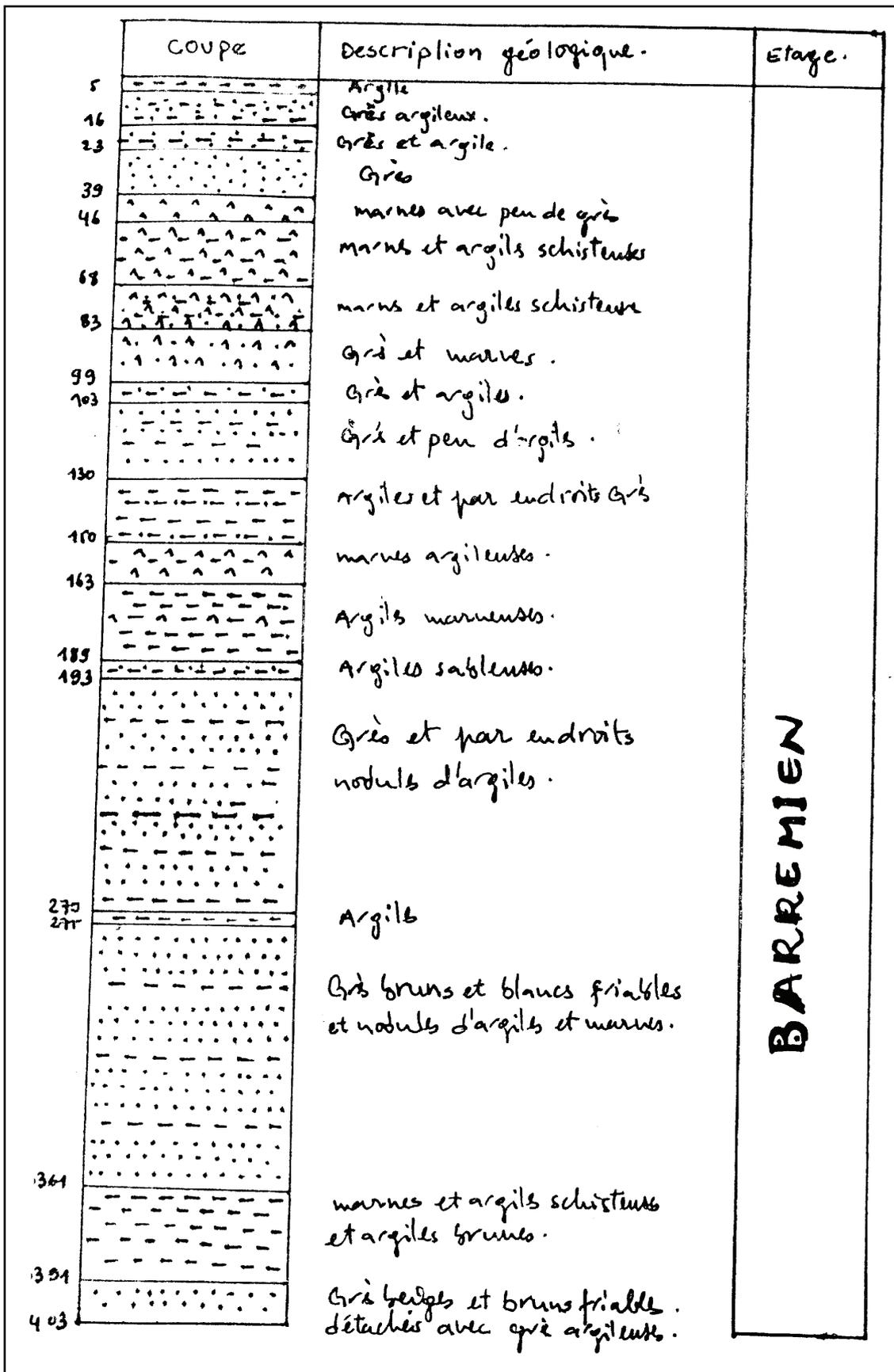


Figure III.15: Coupe lithologique de forage Ain el Ibel (F2) (ANRH)

III.3.3.2.5 Interprétation de la courbe de remontée

Au terme du pompage du 1er palier, le niveau d'eau remonte très rapidement pendant 10 minutes. Après les points du niveau d'eau s'alignent suivant une droite qui nous permet de calculer la transmissivité : $T1 = 3.05.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

Pendant le 2ème palier, après 5 minutes de l'arrêt de pompage, les points représentatifs de l'eau s'alignent pour donner la transmissivité : $T2 = 2.41. 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

III.3.3.2.6 Rayon d'influence et débit d'exploitation

On remarque que, dans le 1er Palier R est de 230 m, tandis que pour le 2ème palier R est de 720 m. sachant que R = le rayon d'influence en m.

Pendant le 1er palier l'eau est claire, mais au cours du 2ème palier après 3 minutes de pompage et pendant 60 minutes, il y a un pompage d'eau usée (polluée) provenant du point de rejet des eaux usées de la ville. Ceci montre que pendant le 2ème palier lorsque la rayon d'influence dépasse 230 m, il y a une infiltration d'eau d'égout ? afin d'éviter la pollution il y a lieu de supprimer le réseau d'égout avoisinant entre temps, avec un débit de pompage maximum de 40 l/s, la pollution pourrait être évitée.

III.3.3.2.7 Conclusion

Dans les conditions des essais, le forage donne un débit de 40 l/s avec un rabattement de 15.5m et un débit de 54 l/s avec un rabattement de 30.04 m.

Avant de commencer l'exploitation du forage, il serait impératif d'arrêter la pollution par le prolongement du collecteur des eaux usées en aval du forage et de faire l'analyse chimique et bactériologique sur les deux paliers.

IV.1 Construction du modèle numérique

IV.1.1 Introduction

Un modèle numérique permet de résoudre les équations régissant les écoulements souterrains au sein d'un milieu poreux. C'est-à-dire qu'à partir de la connaissance d'un certain nombre de paramètres, il est possible de déterminer le flux des eaux souterraines et le niveau de la nappe en tout point du domaine.

Le modèle numérique est directement déduit du modèle conceptuel.

Un modèle conceptuel est une schématisation du fonctionnement d'un système aquifère tel qu'il peut être déduit des investigations de terrain. Sa robustesse dépend directement de l'exhaustivité et de la précision des mesures de terrain. Il est défini par les éléments suivants :

- L'extension du domaine modélisé et les écoulements pris en compte,
- Les caractéristiques des terrains du domaine modélisé vis-à-vis des écoulements,
- Les conditions hydrauliques prévalant aux limites du domaine modélisé.

Le modèle numérique est directement déduit du modèle conceptuel. Le logiciel de modélisation utilisé est présenté ci-après. Les principaux éléments du modèle conceptuel sont ensuite rappelés.

IV.1.2 Présentation du logiciel de modélisation

IV.1.2.1 Un logiciel adapté aux objectifs de l'étude

Dans le cadre de l'étude de modélisation de la nappe d'Ain EL Ibel-Sidi Makhoulouf, le logiciel de modélisation choisi doit répondre à plusieurs critères :

- Il doit être reconnu internationalement
- Il doit être adapté au contexte. L'outil de modélisation doit notamment permettre :
 - La prise en compte de l'ensemble du système aquifère et des écoulements qui s'y produisent
 - Une représentation précise de la géologie de la zone d'étude, en important les données des cotes des toits de chaque couche.
 - La prise en compte des interactions entre eaux souterraines et eaux de surface.

Ainsi, le logiciel PROCESSING MODFLOW apparaît adapté à ces critères. C'est un modèle numérique sophistiqué, basé sur la méthode des différences finies. Il permet la résolution de l'écoulement et du transfert de masse, en 2D et en 3D, en régime permanent et en régime transitoire.

IV.1.2.2 Principales caractéristique du logiciel

IV.1.2.2.1 Une reconnaissance mondiale

Le logiciel utilisé pour la modélisation des écoulements de la nappe d'Ain EL Ibel-Sidi Makhoulf est PROCESSING MODFLOW. Ce logiciel est couramment utilisé le type de contexte hydrogéologique et de problématique rencontré sur la zone d'Ain EL Ibel-Sidi Makhoulf

Cette étude à été réalisée au moyen du logiciel du calcul PM5 la version 5 du logiciel PROCESSING MODFLOW (PM6), élaborée par Wen- Hsing Chiang et Wolfgang Kinzelbach(1998), qui utilise le code MODFLOW mis au point par l'U.S.Geological Survey (USGS) mondialement reconnu, qui permet de simuler les écoulement et le transport de contaminants réactifs en milieu souterrain en régime permanent ou transitoire . Pour cela, PROCESSING MODFLOW peut intégrer plusieurs outils de modélisation :

- MODPATH, qui permet de simuler les lignes d'écoulement de particules à l'aval ou à l'amont d'un point de référence.
- MT3D, qui modélise le transport des solutions contaminants dans la nappe.

V.1.2.2.2 Une bonne adaptation au contexte hydrogéologique

PROCESSING MODFLOW permet de représenter des systèmes hydrogéologiques complexes à partir d'une interface graphique qui facilite l'intégration des données (**Hsing Chiang W et Kinzelbach W.1998**) :

- . Représentation géoréférencées de la zone d'étude en plan ou en section
- . Discrétisation du système hydrogéologique en modèle multicouche
- . Intégration de mailles de tailles variables qui permet de détailler une zone sensible d'un
Projet
- . Importation de fond de carte de formats variés (carte satellite)
- . Importation et interpolation de fichiers de données (fichier Txt, xls) pour décrire la
Géométrie de l'aquifère
- . Importation d'évolutions de suivi de la nappe, d'hydrologie de surface dans le cas d'une
modélisation en régime transitoire

IV.1.2.2.3 Une utilisation conviviale

Plusieurs types de carte et graphiques sont à la disposition du modélisateur pour représenter clairement les résultats à un public non spécialiste.

PROCESSING MODFLOW édite des cartes isopièzes de chaque aquifère modélisé, des cartes des vitesses d'écoulement des eaux souterraines, des bilans détaillés des flux et de transports massiques à l'échelle du système hydrogéologique ou locale.

Pour chaque simulation, PROCESSING MODFLOW calcule les statistiques de calage pour l'ensemble des points d'observation.

PROCESSING MODFLOW vient avec une interface utilisateurs graphique professionnelle, les modèles soutenus et les programmes et plusieurs autres outils de modélisation utiles. L'interface utilisateurs graphique te permet de créer et simuler des modèles facilement et l'amusement. Elle peut importer des infographies par quadrillage de DXF- et manipuler des modèles avec jusqu'à 1.000 périodes d'effort, 80 couches et 250.000 cellules dans chaque couche modèle (**Hsing Chiang W et Kinzelbach W.1998**)

Il est possible également d'exporter les résultats sous format graphique ou SURFER ou DXF ou HPGL et BMP

IV.1.3 Modélisation hydrodynamique

IV.1.3.1 Formulations mathématiques de l'écoulement de la nappe

On dispose des équations suivantes :

- Les équations de diffusivité en nappe libre (**G DE MARSILY 2004**).

.- Equation de continuité :

$$\text{div}(\rho v) + \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \rho q = 0 \quad (\text{IV -1})$$

Où ρ : masse volumique, V : vitesse, w : porosité efficace, q : débit prélevé

- loi de darcy (**G DE MARSILY 2004**) :

* Dans l'hypothèse ou l'on peut négliger la compressibilité de l'eau

$$\vec{v} + \bar{k} \vec{\nabla} h = 0 \quad (\text{IV -2})$$

* Et sinon

$$\vec{v} + \frac{\bar{k}}{\mu} (\vec{\nabla} p + \rho g \vec{\nabla} z) = 0 \quad (\text{IV -3})$$

Où p : pression, k : perméabilité, μ : viscosité cinématique.

- Equation d'état isotherme de l'eau :

$$\rho = \rho_0 \exp(\beta(p - p_0)) \quad (\text{IV -4})$$

Où β est la compressibilité de l'eau, P : pression, p_0 : pression initiale

Nous allons établir à partir de ce système d'équations une équation différentielle dite équation de diffusivité du 2ème ordre. Pour cela, en suivant (**G DE MARSILY 2004**).

On suppose que le milieu poreux n'est saturé que sur une certaine hauteur. Dans ce cas, toute variation de charge se traduit par une variation de la cote de la surface de l'aquifère :

En montant ou en descendant, de l'eau peut être stockée et déstockée « facilement » dans la matrice poreuse, sans mobiliser ni la compressibilité des vides occupés par de l'air antérieurement. On suppose donc w et ρ constants. On admet aussi.

Que l'écoulement est horizontal et que le tenseur de perméabilité est isotrope dans le plan Horizontal $\bar{\bar{K}} = \text{diag} (K, K, K_v)$. On établit ensuite le bilan sur un prisme vertical de base $dx.dy$ (entre le substratum : cote σ et la surface libre : cote h).

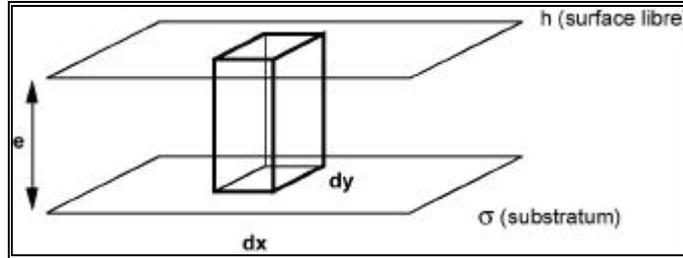


Figure IV.1 : prisme élémentaire de nappe libre.

L'équation de continuité établit le bilan entre le flux massique entrant F , les flux d'échange verticaux D et la variation de masse d'eau :

F : flux massique entrant (par les faces verticales). Pour une unité de temps dt , on intègre la vitesse v sur chaque face :

$$F = \rho dy \left(\int_{\sigma}^h v_x(x,y,z) dz - \int_{\sigma}^h v_x(x+dx,y,z) dz \right) + \rho dx \left(\int_{\sigma}^h v_y(x,y,z) dz - \int_{\sigma}^h v_y(x,y+dy,z) dz \right) \quad (5-5)$$

On remplace v par sa valeur en utilisant la loi de darcy :

$$F = \rho \cdot dx \cdot dy \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_{\sigma}^h K \frac{\partial h}{\partial x} dz \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\int_{\sigma}^h K \frac{\partial h}{\partial y} dz \right] \right\} \quad (IV -6)$$

Et si K est constant sur la verticale :

$$F = \rho \cdot dx \cdot dy \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[K \frac{\partial h}{\partial x} (h - \sigma) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K \frac{\partial h}{\partial y} (h - \sigma) \right] \right\} \quad (IV -7)$$

V : variation de la masse eau de l'élément (pour l'unité de temps dt)

$$V = \rho \omega \frac{\partial h}{\partial t} dx \cdot dy \quad (IV -8)$$

D : débit d'échanges verticaux (pour l'unité de temps dt)

$$D = \rho Q \cdot dx \cdot dy \quad (IV -9)$$

En écrivant $F = V + D$ (conservation de la masse), on obtient (simplifiant par $\rho \cdot dx \cdot dy$)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K \cdot \frac{\partial h}{\partial x} (h - \sigma) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K \cdot \frac{\partial h}{\partial y} (h - \sigma) \right] = Q + \omega \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (IV -10)$$

$$\text{Soit : } \vec{\nabla} [K \cdot (h - \sigma) \vec{\nabla} h] = Q + \omega \frac{\partial h}{\partial t} \quad (IV -11)$$

Cette équation n'est pas linéaire. On peut la rendre linéaire dans deux situations simples :

Le substratum est horizontal ($s = \text{cte} = 0$) et le milieu uniforme (K constant).

$$\text{On a alors : } K \vec{\nabla} (h \vec{\nabla} h) = Q + \omega \frac{\partial h}{\partial t} \quad (IV -12)$$

$$\text{Soit : } \frac{1}{2} \Delta (h^2) = \frac{\omega}{K} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{Q}{K} \quad (IV -13)$$

Equation différentielle en h^2 . En régime permanent ($\frac{\partial h}{\partial t} = 0$), elle est linéaire en h^2 .

Les variations de niveau de surface libre sont faibles par rapport à l'épaisseur de la couche. C'est le cas classique d'une linéarisation. On suppose que $T = K(h-s)$ varie peu avec la charge et est uniforme dans la nappe. Cela donne alors :

$$\Delta h = \frac{Q}{T} + \frac{\omega}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (IV -14)$$

Ou T : transmissivité; Q : Débit prélevé; h : la charge.

C'est une équation aux dérivées partielles du 2ème ordre de type parabolique, type Equation de diffusion (**G DE MARSILY 1994**).

$$\text{Dans le cas de régime permanent, l'équation devient : } \Delta h = \frac{Q}{T} \quad (IV -15)$$

C'est un modèle à base physique, déterministe, capable représenté des écoulements laminaires monophasiques tridimensionnels dans des systèmes multicouches. Il résout l'équation de diffusivité aux dérivées partielles de l'écoulement des eaux souterraines en milieu poreux (combinaison de la loi de Darcy et de l'équation de continuité) par la méthode des différences finies voire (IV-1),(IV-2),(IV-11),(IV-14),et(IV-15) par la méthode des différences finies. Pour se faire l'aquifère doit être discrétisé en mailles quadrangulaires et des conditions aux limites doivent être imposé. Le nombre et la taille des mailles dépendent de la précision attendue et de la nature des données sources (nombre, distribution, qualité) (**Sylvain M.2001**).

La piézométrie calculée au centre de chaque maille tient compte des paramètres hydrodynamiques (conductivité hydraulique porosité), des conditions aux limites (potentiel ou flux imposé, possible liaison avec un réseau hydrographique, etc....) et des conditions de recharge (infiltration, évapotranspiration, éventuels pompages).

Le modèle s'articule sur deux hypothèses fondamentales : les gradients hydrauliques doivent être faibles et la continuité hydraulique de l'aquifère respectée. Et c'est le cas pour le synclinal d'Ain el bel

IV.1.4 Rappel sur le modèle conceptuel retenu

IV.1.4.1 Paramètres hydrodynamiques

Un des paramètres hydrodynamiques nécessaire pour l'élaboration du modèle est la transmissivité. Elle représente le produit de la conductivité hydraulique (perméabilité exprimée en mètre/seconde) par l'épaisseur productive de l'aquifère. Elle caractérise donc la facilité avec laquelle l'eau souterraine peut se déplacer.

La phase de calage a permis d'ajuster ce paramètre. En effet, des incertitudes subsistent quant aux valeurs de perméabilités mesurées sur le terrain, notamment en raison des variations de faciès et des conditions de réalisation des essais (durée du pompage, débit prélevé).

Les valeurs de coefficients d'emménagement disponibles sont rares. Ce paramètre a été renseigné à partir des valeurs généralement admises pour ce type de nappe et a été ajusté lors de la phase de calage en régime transitoire et compris entre 1 et 10%.

IV.1.4.2 Conditions hydrauliques aux limites

Les conditions aux limites définies pour le synclinal d'Ain EL Ibel-Sidi Makhoulf sont les suivantes :

- Les prélèvements AEP, agricoles.
- La recharge de l'aquifère par les précipitations efficaces, prise en compte sous la forme d'un débit surfacique mensuel imposé,
- La limite imperméable à la base du modèle,
- Les potentiels imposés au Nord et au Sud du synclinal,

IV.1.4.3 période de simulation et points de contrôle de la qualité du modèle numérique

Dans un premier temps, le modèle a été calé en régime permanent par rapport à l'état de référence de mai 2002.

Une simulation transitoire a ensuite été effectuée entre 2002 et 2010, période à priori suffisante pour caractériser la réactivité du système lorsqu'il est soumis à des sollicitations et pour laquelle des données piézométriques sont disponibles.

Les points de référence reproduits et qui permettent de vérifier la pertinence du modèle sont d'une part les cartes piézométriques disponibles en 2002 et 2010, et, d'autre part, les évolutions piézométriques du réseau de suivi de l'ANRH.

Au niveau des évolutions piézométriques et compte tenu de l'irrégularité du suivi, c'est essentiellement la reproduction des tendances interannuelles qui a été recherchée.

Les éléments constituant le modèle conceptuel, présenté succinctement dans les paragraphes précédents, sont maintenant décrits de façon plus détaillée, notamment en précisant la façon dont ils ont été intégrés dans le modèle numérique (c'est-à-dire comment ils ont été discrétisés spatialement et temporellement)

Les points suivants successivement abordés :

- Extension/géométrie
- Maillage
- Détermination des valeurs des conditions aux limites
- Points de contrôle pour évaluer la validité du calage

IV.1.5 Extension / Géométrie

IV.1 .5 .1 Limites nord

Est représentée par flanc sud du synclinale Djelfa, ce dernier est plus apparent par le tracé des failles passant par Ain Roumia-Oued Seddeur

IV.1.5.2 Limite ouest

Est représentée par le flanc Est de l'anticlinal de Djebel EL Azreg, par des terrains jurassique, cette limite est considérée dans le modèle comme une limite imperméable (condition de flux nul).

IV.1 .5 3 Limite est

Flanc Ouest de l'anticlinal de Djebel Zerga dont les terrains jurassique représente cette limite, cette limite est considérée dans le modèle comme une limite imperméable (condition de flux nul).

IV.1.5.4 Limites sud

Le synclinal de Djebel Dahouane dut la limite se situe dans la zone de Sidi Makhlouf, cette limite est considérée dans le modèle comme une limite imperméable (condition de flux nul).

IV.1.5.5 Limites nord et sud

Les limites Nord et Sud du modèle sont considérées comme des limites à potentiels imposés. Les potentiels sont définis au centre de chaque maille.

A. Données utilisées :

Les potentiels considérés sont ceux observées sur les cartes piézométriques de 2002

B. Discrétisation spatiale :

Ces limites sont définies en bordure Nord et Sud du modèle par des lignes de mailles à potentiel imposé. Ces lignes coïncident avec des isopièzes (ligne de même potentiel Figure IV.2) :

- La limite Sud correspond à l'isopièze 900 m NGA,
- La limite Nord correspond à l'isopièze 1125 m NGA.

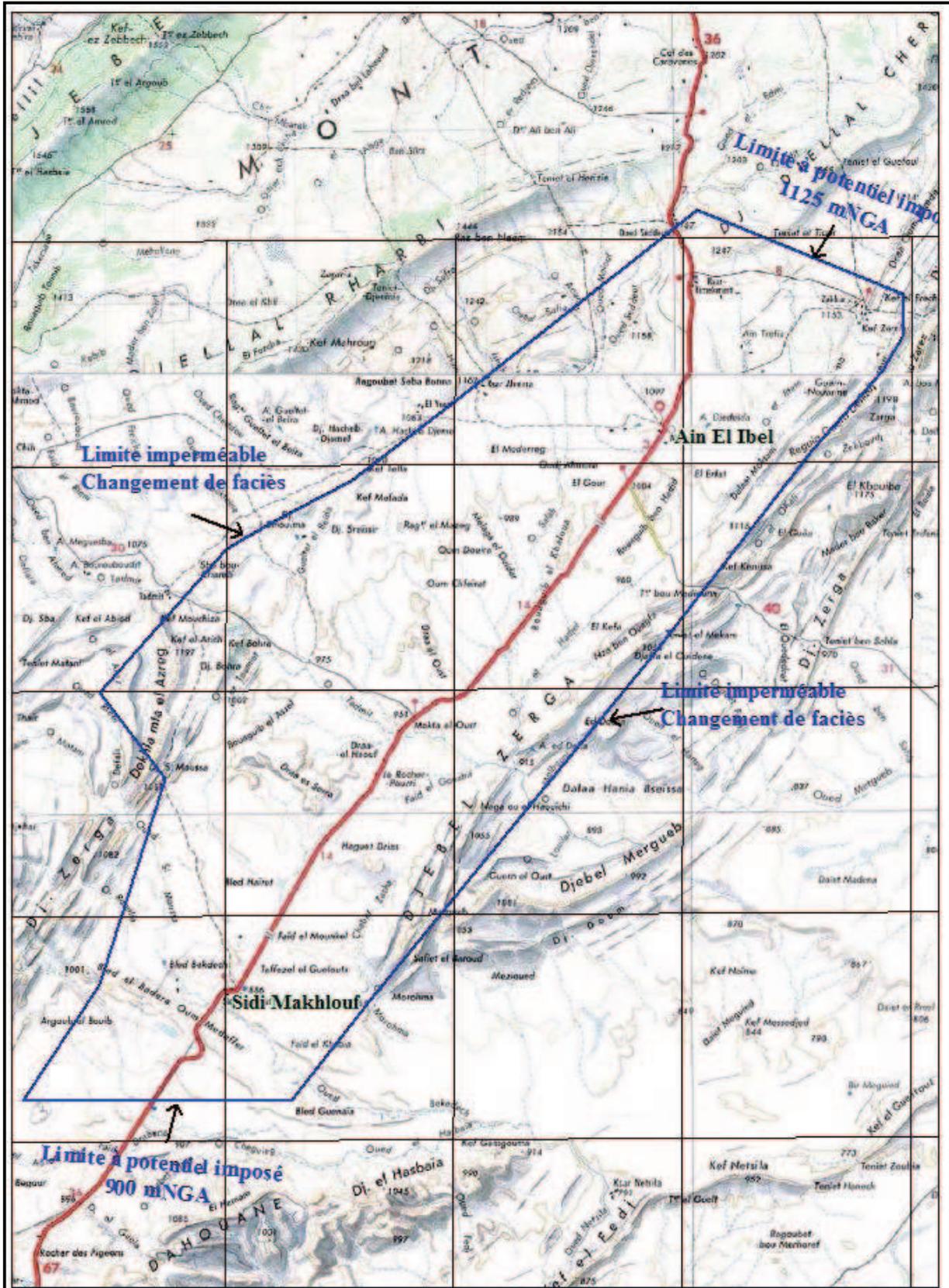


Figure IV.2 : conditions aux limites latérales du modèle

IV.1 .6 Maillage

IV.1.6.1 Démarche adoptée

Pour passer de la description des différents paramètres hydrauliques (extension, conditions limites, caractéristiques hydrodynamiques des terrains) à un modèle numérique, il est nécessaire de « discrétiser » l'espace (et le temps) afin de pouvoir résoudre les équations d'écoulement. La discrétisation consiste à définir des zones élémentaires où les propriétés hydrauliques des terrains sont homogènes : ce sont les mailles du modèle (**SOGREAH.2008**). La finesse des mailles peut également varier en fonction :

- Des données du modèle : plus il y a de données sur une zone, plus il est intéressant d'avoir un maillage fin afin de prendre en compte au mieux ces données.
- De l'importance de certaines zones par rapport à d'autres : une zone de captage est à priori une zone de fortes variations du niveau de la nappe souterraine. Il est donc intéressant d'avoir des mailles plus fines autour du captage afin de mieux reproduire ces variations et donc l'impact du puits.
- Des contours à représenter : par exemple, la modélisation d'une rivière peut nécessiter des mailles plus fines afin de reproduire au mieux son tracé.

Ainsi, pour le modèle d'Ain Ibel-Sidi Makhoulouf, le modèle a été discrétisé de façon homogène en 338 mailles de 1500 m x 1500 m

Un test de sensibilité a été effectué en divisant par deux la taille des mailles. Les résultats des simulations en régimes permanent et transitoire ne sont pas modifiés. Il est donc inutile d'avoir recours à des mailles plus petites.

Sous PROCESSING MODFLOW, le modèle de base est rectangulaire. Les limites du modèle sont obtenues par l'inactivation de certaines cellules.

IV.1.6.2 Epaisseurs des formations prises en compte

L'extension et l'épaisseur des formations modélisées sont basées sur une analyse du contexte géologique (nature des formations, accidents tectoniques) et du comportement hydrogéologique de l'aquifère (conditions aux limites).

A partir de la carte d'épaisseur du réservoir aquifère et du MNT de la zone modélisée, des grilles du toit et du mur du modèle ont pu être réalisées à l'aide du logiciel arc view.

Ces grilles sont directement introduites sous MODFLOW et interpolées au centre de chaque maille.

La géométrie des formations issues des données du maillage correspond donc à ce qui a été défini dans le modèle conceptuel comme l'illustre la Figure IV.5 en page suivante.

Figure IV.5 et est basée sur :

- l'analyse de la carte géologique et de relief (Figure IV.3)
- l'analyse des coupes géoélectriques et carte toit de l'aquifère (Figure IV.4).

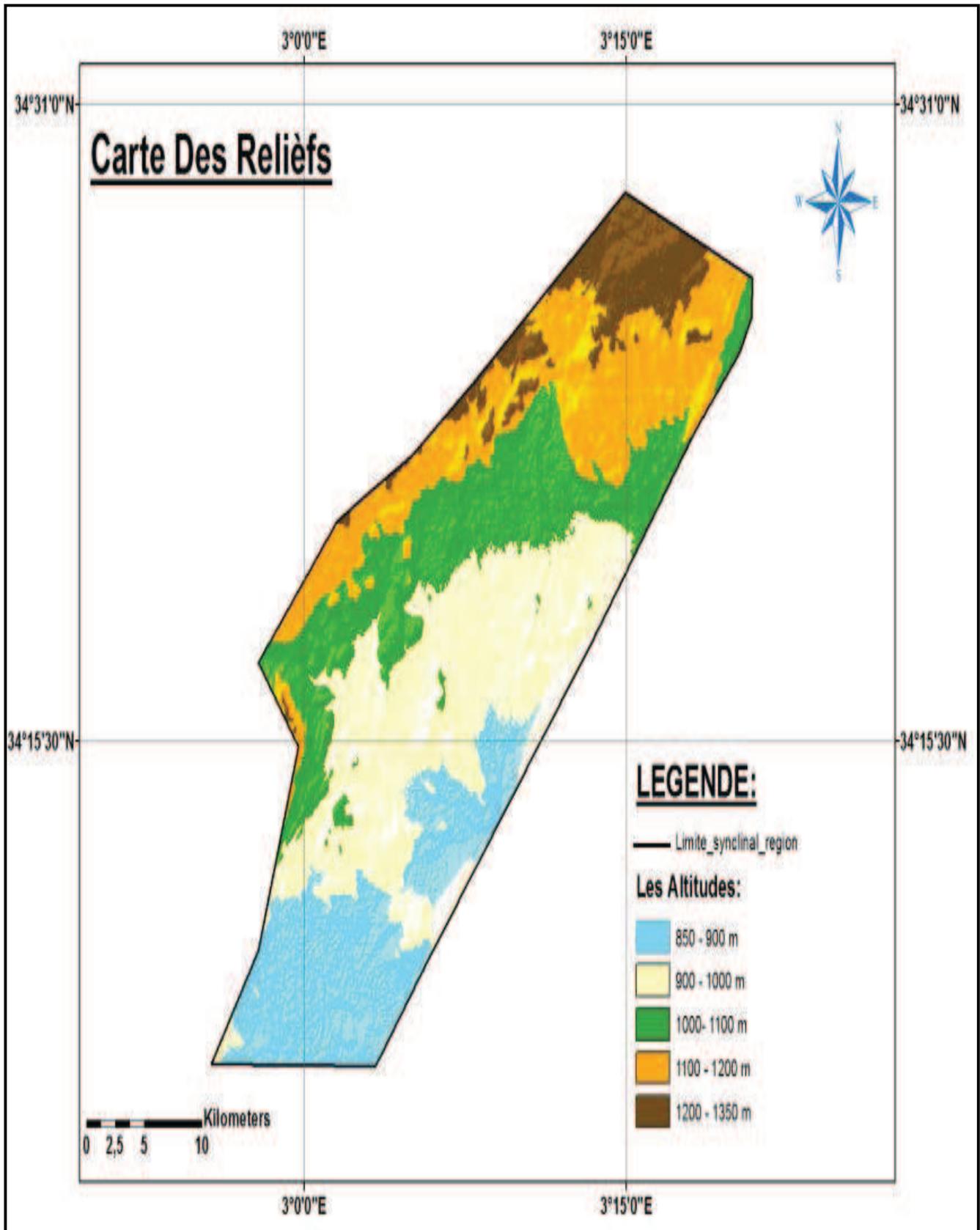


Figure IV.3: Carte de relief du synclinal d’Ain EL Ibel-Sidi Makhlouf

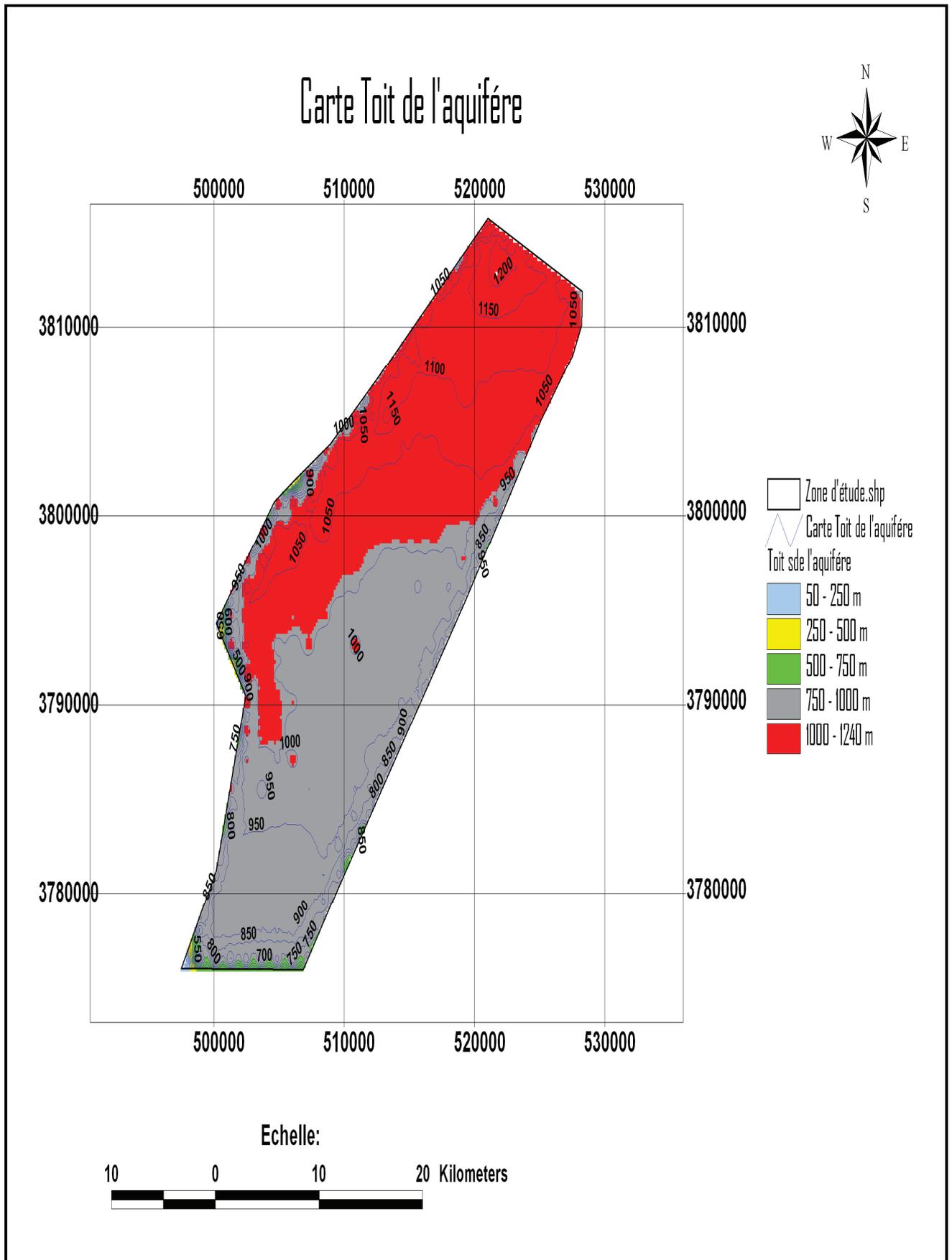


Figure IV.4 : Carte toit de l'aquifère d'Ain EL Ibel-Sidi Makhlouf

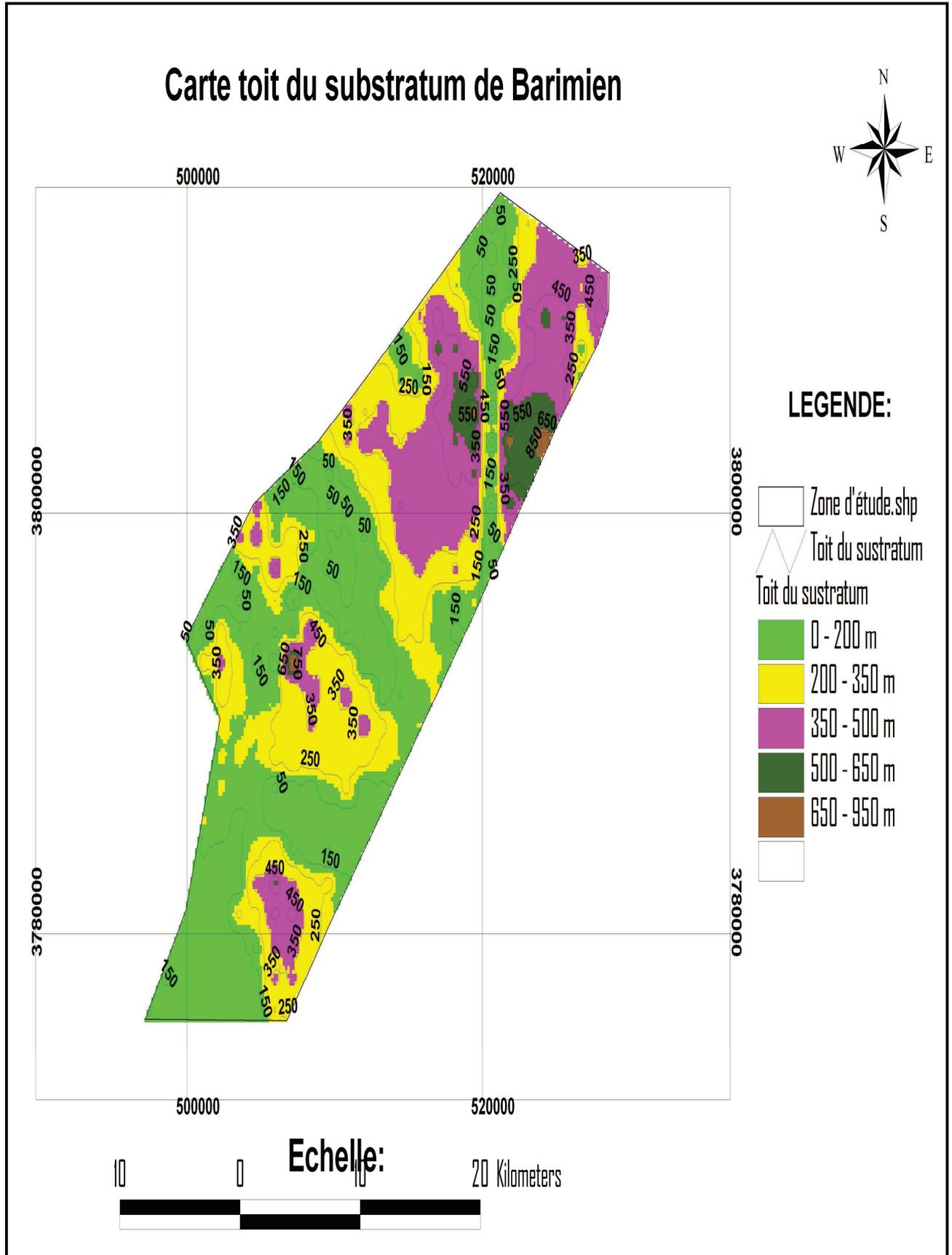


Figure IV.5 : Carte d'épaisseur du domaine modélisé (Ain EL Ibel-Sidi Makhlouf)

IV.1.6.3 Discrétisation spatiale des conditions aux limites

IV.1.6.3.1 Potentiel impose

Les potentiels imposés au Nord et au Sud de la synclinale coïncident avec des lignes isopièzes (de même potentiel). Sous PROCESSING MODFLOW, les potentiels imposés sont affectés aux centres des mailles.

IV.1.6.3.2 Zones de recharge

Les zones de recharge sont définies dans le modèle numérique par des polygones auxquels sont affectées des débits surfaciques différents.

Une recharge uniforme est appliquée sur l'ensemble de la zone modélisée.

IV.1.6.3.3 Forage/Prélèvement

Les prélèvements sont introduits sous PROCESSING MODFLOW avec les coordonnées exactes de chaque point de prélèvements, Les prélèvements sont alors affectés au centre de la maille dans laquelle ils se trouvent.

Dans le cas où plusieurs prélèvements se trouvent dans la même maille, les débits prélevés sont additionnés (**SOGREAH.2010**).

IV.1.6.4 Détermination des valeurs des conditions aux limites

