

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Kasdi-Merbah OUARGLA
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Genie Civil et Hydraulique



N° d'ordre :
Série :

THESE

En vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat en Sciences

Filière : Génie civil

Spécialité : Constructions hydrauliques et aménagements

Présentée par:

M^r. AZLAOUI Mohamed

Thème

**La gestion intégrée des ressources en eau de la wilaya de Djelfa
(Cas de la plaine d'Ain Oussera).**

Soutenue publiquement le 12/04/2018

Devant le jury composé de :

M^r. BOUTOUTAOU Djamel	Professeur	Université d'Ouargla	Président
M^r. NEZLI Imad Eddine	Professeur	Université d'Ouargla	Directeur de thèse
M^r. BRINIS Nafaa	M.C.A	Université de Batna 2	Examinateur
M^r. DJELITA Belkheir	M.C.A	Université de Djelfa	Examinateur

Année Universitaire 2017/2018

Résumé

La plaine d'Ain Oussera est une zone semi-aride, située dans la partie centrale de l'Algérie du nord, elle a connu un développement important depuis le début des années 2000 avec le lancement des programmes de développement agricole. L'augmentation des surfaces irriguées a entraîné un fort accroissement des besoins en eau et par conséquent une surexploitation de la nappe albienne que l'on observe depuis plus d'une trentaine d'années (1985). Une baisse significative de son niveau piézométrique provoque une dégradation de la qualité chimique de ses eaux.

La présente thèse est une contribution à la gestion efficace des eaux souterraines de la plaine étudiée en employant un modèle mathématique proportionné permettant de gérer le potentiel en eau et préserver sa qualité. Pour cette raison, nous avons établi un modèle conceptuel par le programme informatique MODFLOW, qui a la faculté de nous fournir une simulation numérique déterministe et bidimensionnelle, en régime permanent et transitoire, de l'écoulement souterrain des eaux de la nappe. Les principaux résultats ont permis de mieux visionner les différents scénarios des fluctuations piézométriques. Les prédictions établies montrent que cette nappe est dans un état alarmant, d'où la nécessité d'entreprendre une gestion intégrée des ses ressources souterraines, afin de garantir un développement durable.

Mots clés : Ressources en eau, Modélisation, MODFLOW, Qualité des eaux souterraines, nappe de l'Albien, plaine d'Ain Oussera.

Abstract

The Ain Oussera plain, a semi-arid zone in the central part of northern Algeria, has developed significantly since the early 2000 years when a number of agricultural development programs were launched. The increase in irrigated areas has led to a significant increase in water needs and consequently an overexploitation of the aquifer that has been observed over more than 20 years (1985). A significant decrease in its piezometric level caused its deterioration in the chemical quality of its water.

This paper is a contribution about the effective management of groundwater in the area of study, using a mathematical model of the water potential and its quality preservation. In this regard, we have established a conceptual model using the MODFLOW computer program to provide us with a deterministic and twodimensional numerical simulation, in steady and transient state, of the studied aquifer groundwater flow. The main results allowed us to develop a better view of the different scenarios underlying the piezometric fluctuations. The predictions show that the water table is in an alarming state which requires integrated management of its underground resources in order to guarantee sustainable development.

Key words: water Resources, Modeling, MODFLOW, Quality of groundwater, water table of the Albian, plain of Ain Oussera.

المخلص

سهل عين وسارة، هي منطقة شبه جافة ، تقع في الجزء الأوسط من شمال الجزائر، شهدت تطورا كبيرا منذ أوائل سنة 2000 مع إطلاق برامج التنمية الزراعية. وقد أدت الزيادة في المساحات الفلاحية زيادة كبيرة في احتياجات المياه، وبالتالي الاستغلال المفرط للمياه الجوفية التي لوحظت على مدى أكثر من ثلاثين عاما (1985) ادى الانخفاض الكبير في المستوى المياه الجوفية لمنطقه عين وساره الى تدهور النوعيه الكيميائيه لمياه هاته المنطقة.

هذه الأطروحة هو المساهمة في الإدارة الفعالة للمياه الجوفية في المنطقه المدروسه باستخدام النمذجة الهيدروديناميكية لإدارة المياه والحفاظ على جودتها. لهذا السبب، قمنا بتأسيس نموذج نظري من قبل MODFLOW لتزويدنا بمحاكاة عددية حتمية وثنائية الأبعاد، في حالة ثابتة وعابرة، لتدفق المياه الجوفية المدروسة. وقد وفرت النتائج الرئيسية لرؤية أفضل سيناريوهات مختلفة من تقلبات المياه الجوفية. وتشير التوقعات إثبات أن الجيب المائي هي في حالة تنذر بالخطر، وبالتالي الحاجة إلى الإدارة المتكاملة للموارد الجوفية لضمان التنمية المستدامة.

كلمات رئيسية : موارد المياه، النمذجة ، الجيب المائية ، MODFLOW ، جودة المياه الجوفية ، سهل عين وسارة



﴿ 67 ﴾ أفراستم الماء الذي تشربون ﴿ 68 ﴾ أن أنتم أنزلتموه من المزن أم نحن المنزلون ﴿ 69 ﴾

لو نشاء جعلناه أجاجا فلولا تشكرون ﴿ 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 ma thèse;

*Je dédie surtout a ma regrettée mère : Baidlkoul Zaineb qui m'a toujours soutenu
la présente Thèse, 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

Je remercie fortement Ma Femme pour son soutien « psychologique »

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

AZLAOUI

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à remercier tous les intervenants et toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à sa réalisation, en particulier :

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

Monsieur le **Professeur BOUTOUTAOU Djamel**, de l'Université d'Ouargla, qui a bien voulu me faire l'honneur de présider le jury, je le remercie pour sa disponibilité et qu'il trouve ici toute ma gratitude.

Monsieur le **Docteur BRINIS Nafaa**, Maître de conférences à l'université de Batna 2, qui m'a fait le plaisir de participer au jury et l'intérêt qu'il a accordé à ce travail.

Monsieur le **Docteur DJELITA Belkheir**, Maître de conférences à l'université de Djelfa, pour avoir accepté d'examiner mon travail et de faire partie du Jury de cette thèse.

J'adresse mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance à Mme **YOUNSI DJihad**, chef service ANRH de Djelfa.

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

Mes remerciements vont également à tous ceux qui ont participé de loin ou de près pour que j'arrive à ce merveilleux instant à savoir: tous mes enseignants, mes collègues de promo et Mrs : HAMIDI Mustapha, NAFSI Mohamed Salah, Madi Maamar, Benbachir Mohamed, KAREF Salah, ZEGAIT Rachid, FOUFOU Atif, HAIED Nadjib, EL GUIZI Taha, GHIBECHE Ismail.

MOHAMED.

TABLE DES MATIERES

Résumé.....	ii
Abstract.....	iii
الملخص.....	iv
Dédicace.....	v
Remerciement.....	vi
Table des matières.....	vii
Liste des tableaux.....	
Liste des figures.....	
Liste des abréviations.....	
Introduction général.....	01
CHAPITRE I : LE CADRE PHYSIQUE DU MILIEU NATUREL GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE	
Introduction.....	04
I.1. Cadre géographique et milieu naturel.....	04
I.1.1. Situation géographique.....	04
I.1.2. Géomorphologie.....	06
I.1.3. L'élevage et agriculture.....	07
I.1.4. La couverture végétale.....	07
I.1.5. Réseau hydrographique.....	07
I.2. Cadre Géologique.....	08
I.2.2. Lithostratigraphie locale de la région d'étude.....	09
I.2.2.1. Trias.....	09
I.2.2.2. Jurassique.....	09
I.2.2.3. Crétacé inférieur.....	10
I.2.2.4. Crétacé supérieur.....	12
I.2.3. Contexte structural de la région d'Ain Oussera.....	13
I.2.4. Synthèse géophysique.....	15
I.2.4.1. Interprétation des résultats (Etude ALGEO.1980).....	15
I.2.4.2. Interprétation des résultats (Etude de STROJEXPORT PRAGUE.1976).....	16
I.3. Conclusion.....	17
Dédicace	

CHAPITRE II : HYDROCLIMATOLOGIE

II. Introduction.....	19
II.1. Etude des paramètres climatiques.....	20
II.1.1. pluviométrie.....	20
II.1.1.1. Répartition interannuelle de la précipitation.....	20
II.1.1.2. Répartition mensuelle moyenne de la précipitation.....	24
II.1.1.3. Répartition de la précipitation saisonnière.....	25
II.1.1.3. Evaluation de la lame d'eau moyenne annuelle précipitée.....	26
II.1.2. Température.....	30
II.1.2.1. Température moyenne mensuelle.....	30
II.1.3. Humidité.....	31
II.1.4. Vent.....	32
II.2. Régime climatique.....	32
II.2.1. Digramme pluviothermique (Gausсен et Baygnons).....	32
II.2.2. Indice d'aridité mensuelle de De Martone(1923).....	34
II.3. Calcul des paramètres du bilan hydrique.....	35
II.3.1. Evapotranspiration ou déficit d'écoulement.....	35
II.3.1.1. Calcul de l'Evapotranspiration potentielle (ETP).....	35
II.3.1.2. Calcul de l'Evapotranspiration réelle (ETR).....	37
II.3.2. Bilan hydrique par la méthode de G.W.THORNTHWAITE.....	39
II.3.2.1. Estimation de la réserve facilement utilisable (RFU).....	39
II.3.2.2. Etablissement du bilan.....	40
II.3.3. Estimation du ruissellement.....	41
II.3.4. Estimation de l'Infiltration.....	42
II.4. Conclusion.....	43

CHAPITRE III : HYDROGEOLOGIE ET HYDRODYNAMIQUE DU SYSTEME AQUIFERE DE LA PLAINE D'AIN OUSSERA

III. Introduction.....	45
III.1 Identification des différents niveaux aquifères.....	45
III.1.1. Remplissage du Quaternaire.....	45
III.1.2. Miocène.....	45
III.1.3. Eocène inférieur et moyen.....	45

III.1.5. Cénomaniens.....	46
III.1.5. Albien.....	46
III.1.4. Turonien.....	46
III.1.6. Barrémien.....	46
III.2. Aquifère de l'Albien inférieur.....	47
III.3. Structure et Géométrie du l'aquifère.....	49
III.3.1. Structure du l'aquifère.....	49
III.3.1.1. Coupe hydrogéologique A.....	49
III.3.1.2. Coupe hydrogéologique B.....	50
III.3.1.3. Coupe hydrogéologique C.....	50
III.3.2. Epaisseur du réservoir de la nappe de l'Albien inférieur.....	52
III.4. Les paramètres hydrodynamiques de la nappe de l'Albien.....	53
III.4.1. Transmissivité.....	53
III.4.2. Perméabilité.....	54
III.4.3. Les débits spécifiques issus des forages.....	55
III.4.4. Coefficient d'emménagement.....	55
III.5. Piézométrie.....	56
III.6. Bilan hydrique du système aquifère.....	58
III.6.1. Infiltration directe des précipitations.....	58
III.6.2. L'apport souterrain à partir de la bordure Sud du système aquifère.....	59
III.6.3. Relation Nappe – Oued.....	60
III.6.4. Les prélèvements.....	60
III.6.4.1. Prélèvement pour alimentation en eau potable.....	60
III.6.4.2. Prélèvement agricole.....	62
III.6.4.3. Le volume d'eau souterrain sortant à partir de la bordure Nord.....	64
III.6.5. Bilan général de la nappe Albienne	64
III.7. Conclusion.....	65

**CHAPITRE IV: HYDROCHIMIE ET QUALITE DES EAUX
SOUTERRAINES DU SYSTEME AQUIFERE DE LA PLAINE D'AIN
OUSSERA**

IV. Introduction.....	67
IV.1. Méthodologie.....	67
IV.1.1. Prélèvement.....	67
IV.2. Interprétation des résultats.....	68

IV.2.1. Paramètres physique de l'eau.....	68
IV.2.1.1. Conductivité électrique.....	68
IV.2.1.2. Degré de la minéralisation des eaux.....	70
IV.2.1.3. Potentiel hydrogène de l'eau (pH).....	71
IV.2.1.4. TDS (Total dissolved solids).....	71
IV.2.1.5. Dureté Total ou degré hydrométrique totale (D.H.T).....	71
IV.2.2. Paramètres chimiques.....	72
IV.2.2.1. Calcium (Ca^{++}).....	72
IV.2.2.2. Magnesium (Mg^{++}).....	72
IV.2.2.3. Sodium (Na^+).....	72
IV.2.2.4. Potassium (K^+).....	72
IV.2.2.5. Chlorures (Cl^-).....	73
IV.2.2.6. Les sulfates (SO_4^{-2}).....	73
IV.2.2.7. Bicarbonates (HCO_3^-).....	73
IV.2.2.8. Nitrates (NO_3^-).....	74
IV.2.2.9. Evolution des Nitrates (NO_3^-).....	75
IV.2.3. Le faciès chimique.....	77
IV.2.3.1. Classification des eaux d'après PIPER.....	77
IV.2.3.2. Classification des eaux d'après Schoeller-Berkaloff.....	79
IV.2.4. Aptitude des eaux à la potabilité.....	80
IV.2.5. Aptitudes des eaux à l'irrigation.....	81
IV.3. Caractérisation géochimique.....	84
IV.4. Conclusion.....	85

**CHAPITRE V GESTION INTERGREE DES RESSOURCES EN EAU :
LA MODELISATION**

V. Introduction.....	87
V.1. Généralités sur la modélisation hydrogéologique.....	87
V.1.1. Modèles mathématiques en hydrogéologie.....	87
V.1.2. Formulations mathématiques de l'écoulement.....	88
V.1.3. Méthodes de résolution de l'équation de diffusivité.....	89
V.1.4. Conditions initiales et conditions aux limites.....	90
V.2. Présentation du logiciel de modélisation.....	91
V.2.1 Code choisi.....	91

V.2.2. Logiciel adapte aux objectifs de l'étude.....	92
V.2.3. Une bonne adaptation au contexte hydrogéologique.....	92
V.2.4. Une utilisation conviviale.....	93
V.2.5. Méthodologie suivi pour la construction du modèle.....	93
V.3. Modèles conceptuel et numérique.....	94
V.3.1. Model conceptuel.....	94
V.3.2. Délimitation de l'extension de la zone d'étude.....	95
V.3.3. Donnée géologique.....	95
V.3.4. Géométrie du modèle.....	96
V.3.4.1. Extension verticale du système aquifère.....	96
V.3.4.2. Extension Horizontale.....	99
V.3.5. Donnée climatologique.....	99
V.3.6. Chroniques piézométriques.....	99
V.3.7. Paramètre hydrodynamique.....	101
V.3.8. Discrétisation spatial des conditions aux limites.....	101
V.3.8.1. Condition aux frontières (conditions de Dirichlet).....	101
V.3.8.2. Condition de flux (condition de Neumann).....	101
V.3.8.3. Condition mixtes de potentiel et de flux (Condition de Cauchy).....	102
V.3.9. Prélèvements.....	104
V.3.10. Maillage.....	108
V.3.11. période de simulation et points de contrôle de la qualité du modèle.....	109
V.4. Conclusion partielle.....	109
V.5. Etude du fonctionnement hydrodynamique de la nappe à l'aide de la modélisation hydrogéologique.....	110
V.5.1. Régime Permanent.....	110
V.5.1.1. Calage du modèle pour l'année 1985.....	110
V.5.1.2. Résultats du calage en régime permanent.....	111
V.5.1.2.1. Piézométrie calée.....	111
V.5.1.2.2. Paramètres de calage.....	113
V.5.1.2.3. Bilan des flux.....	114
V.5.2. Régime Transitoire.....	114
V.5.2.1. Paramètres de calage.....	115
V.5.2.2. Résultats du calage en régime Transitoire.....	115
V.5.2.2.1. Chronique de la piézométrie 1985-2014.....	115

V.5.2.2.2. Piézométrie.....	119
V.5.2.2.3. Bilan hydraulique de la nappe.....	120
V.6. Conclusion partielle.....	121
V.7. Exploitation du modèle.....	122
V.7.1. Démarche adopté.....	122
V.7.2. Composant des scénarios.....	122
V.7.2.1. Prélèvement.....	122
V.7.2.2. Scénario simulés.....	124
V.7.3. Résultats des simulations.....	124
V.7.3.1. Scénario de référence.....	124
V.7.3.3. Scénario N°2.....	132
V.8. Conclusion.....	137
Conclusion générale.....	139
Références bibliographiques.....	143
Annexes.....	148
Annexe I : Log litho-stratigraphiques du forage Bou Cedraïa.....	149
Annexe II : Log litho-stratigraphiques du forage El Khrachem.....	150
Annexe III : Log litho-stratigraphiques du forage Taguine-Sud.....	151
Annexe IV : Log litho-stratigraphique du forage F8 Ain Oussera.....	152
Annexe V : Synthèses des coupes géoélectriques de la plaine d'Ain Oussera.....	153
Annexe VI : Synthèses des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère Albien de la plaine d'Ain Oussera.....	154
Annexe VII : Extrait de la carte d'Evapotranspiration de la plaine d'Ain Oussera.....	155
Annexe VIII : Levés piézométriques de la nappe de la plaine d'Ain Oussera durant l'année 2014.....	156

LISTE DES TABLEAUX

Tableau.I.1: Nombre de la population qui occupent la plaine d’Ain Oussera.....	05
Tableau.I.2: Nombre des sondages réalisés.....	15
Tableau.II.1 : Caractéristiques des stations pluviométriques.....	19
Tableau.II.2: Les précipitations moyennes mensuelles de la plaine d’Ain Oussera....	24
Tableau.II.3: Répartition des hauteurs de la précipitation saisonnière.....	26
Tableau.II.4: Précipitation moyenne annuelle aux différentes stations.....	27
Tableau.II.5: Répartition de la précipitation moyenne en fonction des surfaces.....	28
Tableau.II.6: Répartition de la précipitation moyenne en fonction des surfaces.....	29
Tableau.II.7: Résultats de calcul de la lame d’eau moyenne annuelle précipitée.....	30
Tableau.II.8: Variation des températures moyennes mensuelles (ONM).....	30
Tableau.II.9 : Variation de l’humidité moyenne mensuelle Station d’Ain Oussera....	31
Tableau.II.10: La vitesse moyenne mensuelle (1995-2004).....	32
Tableau.II.11: Valeurs moyennes mensuelles des précipitations (mm) et températures (°c) à la station d’Ain Oussera (1991-2011).....	33
Tableau.II.12: Indice d’aridité mensuelle.....	34
Tableau.II.13: Evaluation de l’ETP moyenne mensuelle et annuelle par la formule de Thorntwaite à la station d’Ain Oussera (1914-2011).....	36
Tableau.II.14: Evaluation de l’ETP moyenne mensuelle et annuelle par la formule de Thorntwaite à la station Ksar Challala (1985-2007).....	37
Tableau.II.15 : Résultats des calculs de l’ETR selon la méthode de TURC.....	38
Tableau.II.16 : Bilan hydrique selon Thornthwaite à la station d’Ain Oussera.....	40
Tableau.II.17 : Bilan hydrique selon Thornthwaite à la station de Ksar Challala (1985-2007).....	41
Tableau. II.18 : Résultats du calcul du ruissellement.....	42
Tableau.III.1 : l’apport souterrain vers la nappe de l’Albien.....	59
Tableau.III.2 : Les Forages AEP exploitent dans la nappe d’eau Albienne.....	61
Tableau.III.3 : Les superficies des cultures irriguées.....	63
Tableau.III.4 : Estimation des prélèvements sur la nappe albienne.....	63
Tableau.III.5 : Emission à partir de la limite Nord du système aquifère.....	64
Tableau.III.6 : Bilan hydraulique de la nappe Albienne.....	64
Tableau.IV.1: Résultats des analyses physico-chimiques des eaux de la nappe albienne d’Ain Oussera.....	68
Tableau.IV.2: Classification des eaux de la nappe en fonction de la Conductivité....	70
Tableau.IV.3: Dureté des eaux en °F.....	71

Tableau IV.4 : Normes de potabilité de l'O.M.S.....	81
Tableau IV.5: Résultats obtenus après interprétation du diagramme de Richards.....	82
Tableau IV.6: Caractéristiques géochimiques des sources de salinité.....	84
Tableau.V.1 : Paramètres du Bilan hydraulique de la zone d'étude.....	99
Tableau.V.2 : L'évolution de la population de la plaine d'Ain Oussera.....	105
Tableau.V.3 : Résultat du calage en régime permanent.....	112
Tableau.V.4 : Bilan hydraulique calculé dans le cas du régime permanent établi pour l'année 1985.....	114
Tableau.V.5 : Résultat du calage en régime transitoire 2014.....	116
Tableau.V.6 : Bilan hydraulique calculé dans le cas du régime Transitoire établi pour l'année 2014.....	120
Tableau.V.7 : Nouveaux forages pour les besoins en eaux potables.....	123
Tableau.V.8 : Composantes des scénarios simulés.....	124
Tableau.V.9 : Bilan de la nappe Albienne 2024.....	128
Tableau.V.10 : Bilan de la nappe Albienne 2024.....	132
Tableau.V.11 : Bilan de la nappe Albienne pour l'année 2014 et 2024.....	132
Tableau.V.11 : Bilan de la nappe Albienne 2024.....	136
Tableau.V.12 : Bilan de la nappe Albienne pour l'année 2014 et 2024.....	137

LISTE DES FIGURES

Fig.I.1 : Carte situation de la plaine d’Ain Oussera.....	05
Fig.I.2 : Les unités géomorphologiques de la plaine d’Ain Oussera.....	06
Fig.I.3 : Carte réseau hydrographique de la plaine d’Ain Oussera.....	07
Fig.I.4 : Schéma structurale des chaines alpines de la Méditerranée occidental.....	08
Fig.I.5 : Carte géologique de la plaine d’Ain Oussera.....	10
Fig.I.6 : Carte structurale de la plaine d’Ain Oussera.....	14
Fig.I.7: Coupe géologique schématique de la plaine d’Ain Oussera.....	14
Fig.I.8 : Carte positionnement des sondages électriques.....	16
Fig.I.9 : Coupe géoélectrique de la région Ain Hidjel.....	17
Fig.II.1: Variation annuelle de la précipitation_ Station Ain Oussera (1914-2011)....	21
Fig.II.2:Variation annuelle de la précipitation_ Station Guelt Esstel (1914-1979)....	22
Fig.II.3:Variation annuelle de la précipitation_ Station Guelt Esstel (1967-2011)....	23
Fig.II.4:Variation annuelle de la précipitation_ Station Ksar Chellala (1985/2007)...	23
Fig.II.5 : Variation saisonnière de la précipitation dans la plaine d’Ain Oussera.....	26
Fig.II.6 : Carte des isohyètes pluviométriques de la plaine d’Ain Oussera.....	28
Fig.II.7 : Carte des polygones de thiessen de la plaine d’Ain Oussera.....	29
Fig.II.8 : Répartition mensuelle de la température d’Ain Oussera (1991-2011).....	31
Fig.II.9: Diagramme pluviothermique de la station d’Ain Oussera (1991-2011).....	33
Fig.II.10: Abaque de l’Indice d’aridité Mensuel de DE Martone 1923.....	35
Fig.III.1 : Caractéristiques hydrogéologiques des différentes formations.....	47
Fig.III.2 : coupe hydrogéologique à travers la plaine d’Ain Oussera.....	48
Fig.III.3:Positionnement forages composant les corrélations Lithostratigraphiques...	49
Fig.III.4 : Coupe hydrogéologique A.....	50
Fig.III.5 : Coupe hydrogéologique B.....	51
Fig.III.6 : Coupe hydrogéologique C.....	51
Fig.III.7 : Carte d’égale épaisseur de l’Albien inférieur.....	52
Fig.III.8 : Carte de la transmissivité de l’Albien inférieur.....	54
Fig.III.9 : Carte de la perméabilité de l’Albien inférieur.....	55
Fig.III.10 : Carte des débits spécifiques de l’Albien inférieur.....	56

Fig.III.11 : Carte de surveillance de réseau piézométrique.....	56
Fig.III.12 : Carte piézométrique de la nappe de l'Albien inférieur (Mai 2014).....	58
Fig.III.13 : Carte de volume d'eau mobilisé de la nappe d'Ain Oussera.....	62
Fig.III.14 : Carte des points dans la nappe d'Ain Oussera (Inventaire 2014).....	64
Fig.IV.1: Carte de situation des points d'eaux échantillonnés dans la plaine d'Ain Oussera.....	68
Fig.IV.2: Carte répartition spatiale de la conductivité électrique dans la nappe albienne d'Ain Oussera (Octobre 2014).....	69
Fig.IV.3: Carte répartition spatiale de la conductivité électrique dans la nappe albienne d'Ain Oussera (Septembre 2004).....	70
Fig.IV.4: Carte répartition spatiale des teneurs en sulfate (SO_4^{2-}). Octobre 2014.....	74
Fig.IV.5: Carte répartition spatiale des teneurs Nitrates (NO_3^-). Octobre 2014.....	75
Fig.IV.6: Carte répartition spatiale des teneurs Nitrates (NO_3^-). Septembre 2004.....	76
Fig.IV.7: Carte répartition spatiale des teneurs Nitrates (NO_3^-). Juin 1996.....	78
Fig.IV.8: Classification des eaux de la nappe d'Ain Oussera selon piper. Octobre 2014.....	78
Fig.IV.9: Classification des eaux de la nappe d'Ain Oussera selon Schoeller-Berkaloff Octobre 2014.....	79
Fig.IV.10: Classification des eaux de la nappe d'Ain Oussera selon Schoeller-Berkaloff Octobre 2014.....	80
Fig.IV.11 : Diagramme de Richards: classification des eaux d'irrigation en fonction du S.A.R.....	83
Fig.IV.12 : Rapports molaires Na/Cl, SO_4/Cl , des principales sources de salinité.....	84
Fig.V.1: Schéma des étapes de développement d'un modèle numérique en Hydrogéologie.....	94
Fig.V.2 : Extension de la zone modélisée.....	95
Fig.V.4 : Modèle Numérique de Terrain de la zone modélisée (MNT).....	97
Fig.V.5: Carte de Toit du substratum de la zone modélisée.....	98
Fig.V.6: Carte d'égale épaisseur de l'Albien inférieur.....	98
Fig.V.7: Carte de réseau piézométrique de la plaine d'Ain Oussera.....	100
Fig.V.8: Carte piézométrique de l'aquifère de l'Albien d'Ain Oussera.....	100
Fig.V.9: Calcul des débite d'échange rivière-nappe selon Modflow.....	102
Fig.V.10 : Carte des conditions aux limites du domaine modélisé.....	104
Fig.V.11 : L'évolution de la population de la plaine d'Ain Oussera.....	106
Fig.V.12 : L'évolution des prélèvements annuelle destinée à l'AEP.....	106

Fig.V.13 : L'évolution des prélèvements annuelle destinée à l'agriculture.....	107
Fig.V.14 : Vue en plan du maillage 2D.....	108
Fig.V.14 : Comparaison entre piézométrie calculée et piézométrie observée.....	111
Fig.V.15 : La différence entre valeurs mesurées et valeurs calculées du niveau piézométrique après calibration du modèle, en régime permanent (mai 1985).....	112
Fig.V.16 : Répartition spatiale des perméabilités adoptées pour le calage en régime permanent année 1985.....	113
Fig.V.17 : Répartition spatiale des coefficients d emmagasinement adoptés pour le calage.....	115
Fig.V.18 : Courbe piézométrique simulée et observée sur le piézomètre 07.....	116
Fig.V.19 : Courbe piézométrique simulée et observée sur le piézomètre 27.....	117
Fig.V.20 : Courbe piézométrique simulée et observée sur le piézomètre PZ09.....	117
Fig.V.21 : Courbe piézométrique simulée et observée sur le piézomètre PZ12.....	118
Fig.V.22 : Courbe piézométrique simulée et observée sur le piézomètre PZ21.....	119
Fig.V.23 : Superposition des cartes piezométriques observée et calculée en régime transitoire (Mai 2014).....	120
Fig.V.24 : Carte piézométrique simulée 2024.....	124
Fig.V.25: Scénario de référence -carte des rabattements de la nappe Albienne 2024..	125
Fig.V.26 : Scénario de référence. Piézométrie simulée au piézomètre PZ10.....	125
Fig.V.27: Scénario de référence. Piézométrie simulée au piézomètre PZ5	126
Fig.V.28 : Scénario de référence. Piézométrie simulée au piézomètre PZ84.....	126
Fig.V.29 : Scénario de référence. Piézométrie simulée au piézomètre PZ29.....	127
Fig.V.30 : Scénario de référence. Piézométrie simulée au piézomètre PZ59.....	127
Fig.V.31: Scénario 1. Piézométrie simulée au piézomètre PZ10.....	129
Fig.V.32: Scénario 1. Piézométrie simulée au piézomètre PZ84.....	129
Fig.V.33: Scénario 1. Piézométrie simulée au piézomètre PZ29.....	130
Fig.V.34: Scénario 1. Piézométrie simulée au piézomètre PZ59.....	130
Fig.V.35: Scénario 1 -carte des rabattements de la nappe Albienne 2024.....	131
Fig.V.36: plan situation des périmètres (Oued Elkalba et Keskes).....	133
Fig.V.37: Scénario 2. Piézométrie simulée au piézomètre PZ10.....	133
Fig.V.38: Scénario 2. Piézométrie simulée au piézomètre PZ09.....	134
Fig.V.39: Scénario 2. Piézométrie simulée au piézomètre PZ29.....	134
Fig.V.40: Scénario 2. Piézométrie simulée au piézomètre PZ59.....	135
Fig.V.41: Scénario 2. Piézométrie simulée au piézomètre PZ84.....	135

LISTE DES ABREVIATIONS ET DES PARAMETRES

P : Précipitations

D : Déficit d écoulement

DA : Déficit agricole

R : Ruissellement

I : Infiltration

C.E : Conductivité électrique

R.s : Résidus sec

méq/l : Milliéquivalent par litre

mg/l : Milligramme par litre

K : Coefficient de perméabilité

T : Coefficient de transmissivité

S : coefficient d emmagasinement

div : Divergent

grad : Gradient

e : Epaisseur mouillée de l aquifère

h : Charge hydraulique

Hcal : Charge hydraulique calculée

Hmes : Charge hydraulique mesurée

ETP : Evapotraspiration potentielle

ETR : Evapotranspiration réelle

RFU : Réserve facilement utilisable

AEP : Alimentation en eau potable

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

D.P.A.T : Direction de la planification et de l'aménagement du territoire

DSA : Direction des Services Agricoles.

DRE : Direction des Ressources en eau.

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

ONM : Office National Météorologique.

ONS : Office nationale de statistique

MNT : Modèle numérique de terrain

SAR : Sodium absorption ratio

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Au cours des dix dernières années, l'Algérie a engagé une nouvelle politique qui vise à protéger et sauvegarder les ressources en eaux, car l'accroissement des populations et le développement des agglomérations ; des unités industrielles et des terres cultivées ont eu pour corollaire une dégradation de la qualité des eaux souterraines et de surface conjuguée à une baisse très significative des ressources en eaux souterraines, seules réserves d'eau pour l'alimentation des populations. Le déficit en eau est devenu inquiétant au cours de nombreuses années (1972-1983, 1991-1996 et 2000-2002), confirmant les diverses expertises partant d'hypothèse et usant de méthodologies différentes qui ont toutes conclu que l'Algérie sera entre 2010 et 2025 confrontée à une pénurie.

Les régions steppiques semi-arides de notre pays souffrent de graves récessions d'eau, où les périodes de sécheresse s'étalent sur plusieurs mois de l'année. Les nappes souterraines sont excessivement sollicitées, ce qui se traduit par des rabattements importants du niveau piézométrique de ces nappes aquifères au point où les réserves, déjà entamées, ne peuvent répondre que partiellement aux besoins en eau, en l'absence d'autres alternatives pour pallier au manque accru d'eau dans ces régions.

La plaine d'Ain Oussera, sise dans le territoire de la wilaya de Djelfa, s'inscrit dans un domaine steppique dans la partie centrale de l'Algérie du nord. La nappe des grès de l'Albien doit subvenir à l'ensemble des besoins en eau de la population de la région. La nappe superficielle des alluvions de l'Oued Touil et du Plio-Quaternaire constitue un aquifère secondaire peu important exploité par des puits traditionnels. La plaine d'Ain Oussera a connu un développement important depuis le début des années 2000, avec le lancement des programmes du FNRDA (Fonds National de Régulation et Développement Agricole), puis FNDIA (Fonds National Développement et d'Investissement Agricole). L'augmentation des surfaces irriguées a entraîné un fort accroissement des besoins en eau, et par conséquent un épuisement de la nappe albienne, une baisse significative du niveau piézométrique de la nappe, et une dégradation de la qualité chimique de ses eaux à l'échelle de la région.

L'adoption d'une approche de gestion intégrée des ressources en eaux souterraines dans notre projet de thèse, va nous permettre de communiquer aux décideurs la nécessité d'aménagement durable des ressources hydriques et d'éviter les conflits d'usage de l'eau mobilisable, tout en prenant en considération les divers intérêts sociaux, économiques et environnementaux.

Il est primordiale, en premier lieu, de point de vue quantitatif, d'estimer la variation des flux entrants (recharge) et sortants (prélèvements) ainsi que les fluctuations des réserves de la nappe aquifère. L'utilisation des simulateurs numériques s'avère nécessaire pour traiter et évaluer les divers scénarios futurs de la gestion des eaux, sans pour autant négliger et comprendre la façon avec laquelle la société consomme et pollue cette richesse naturelle souterraine.

Pour atteindre l'objectif principal de cette recherche, nous avons structuré le travail en cinq chapitres :

- Le premier chapitre est une présentation du contexte géographique et géologique de la région d'étude, ainsi que l'identification de la géométrie des différents horizons aquifères.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'évaluation des différents termes du bilan hydrologique en s'appuyant, essentiellement, sur les relevés pluviométriques, des sources d'alimentation (précipitations, ou oueds) et d'exhaure (pertes) par évaporation, ou exploitation, etc...
- Le troisième chapitre consiste à établir une synthèse des données hydrogéologiques afin de déterminer les caractéristiques de l'aquifère par l'établissement d'une carte piézométrique, d'indiquer les directions de l'écoulement des eaux, et d'évaluer les paramètres hydrodynamiques.
- Dans le quatrième chapitre nous nous intéressons à l'étude hydrochimique des eaux, en identifiant les différents faciès hydrochimiques des eaux, l'origine de leur chimisme, d'apprécier leur aptitude aux différentes utilisations.
- Enfin, le cinquième chapitre porte sur l'analyse du fonctionnement hydrodynamique de la nappe, par la modélisation mathématique de la nappe albienne de la plaine d'Ain Oussera. Grâce au modèle mathématique, et après un calage en régime permanent et en régime transitoire, il nous a été possible de faire des simulations des différents scénarios d'exploitation, et de concevoir, par conséquent, l'état de la nappe pour divers horizons. Ceci nous a permis, en conclusion, de recommander comment gérer raisonnablement cette précieuse ressource en eau souterraine dans cette région.

CHAPITRE I

LE CADRE PHYSIQUE DU MILIEU NATUREL GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE

Introduction

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 locale, élaborée à la base d'une compilation bibliographique.

I.1. Cadre géographique et milieu naturel

I.1.1. Situation géographique

La plaine d'Ain Oussera, s'insère dans le cadre géographique des hautes plaines Algéroises, située dans la partie centrale de l'Algérie du Nord, de la wilaya de Djelfa, entre 2°15' et 3°45' de longitude Est et 35° et 35°40' de latitude Nord. A 200 Km environ au Sud d'Alger, la plaine s'étend sur 105 Km suivant un axe NE - SW, et sur 30 Km suivant un axe perpendiculaire. Sa superficie est d'environ 3795 km². Les limites d'extension généralement admises sont les suivantes (Figure I.1) :

- Au Sud les chaînes montagneuses de Kef el Bkhour, des Oukett Rharbi et Chergui et de Sebaa Rous.
- Au Nord la limite est marquée par les reliefs des Koudiat el Mouilah, el Taïchah et el Rherbania.
- La limite Ouest est fixée par l'Oued Touil.
- A l'Est, la route Birine – Had Sahary constitue la limite du domaine d'étude.

La plaine d'Ain Oussera montre un relief relativement peu tourmenté. L'altitude y varie de 700 m à 800 m. Elle augmente faiblement du Nord vers le Sud. A l'Est, en s'approchant de la chaîne des Sebaa Rous, l'altitude dépasse les 900 m.

La principale agglomération de la plaine est la ville d'Ain Oussera (Tableau I.1) qui se situe à environ 200 km au sud d'Alger et 90 km au Nord de Djelfa. La plaine est occupée par 08 communes, le tableau ci-dessous montre le nombre des habitas en 2014 pour chaque commune.

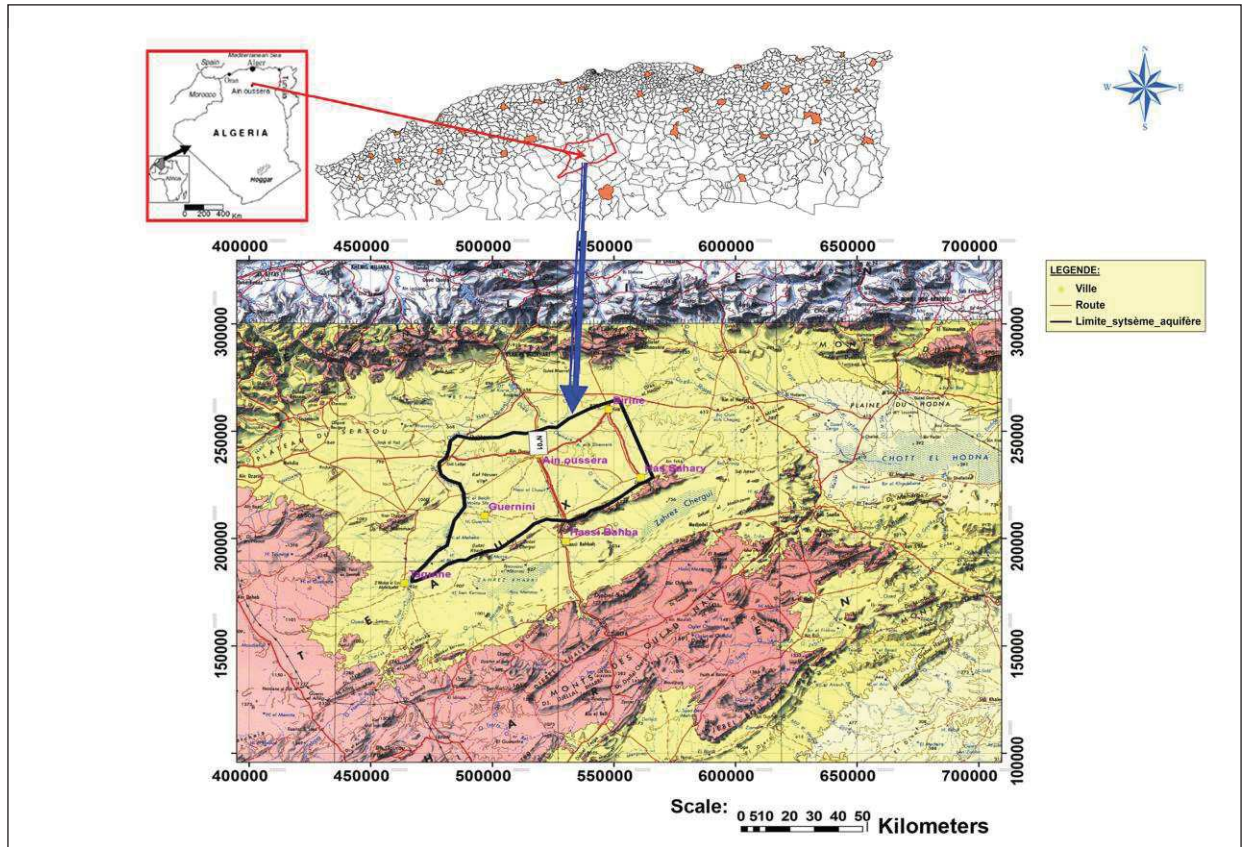


Fig.I.1 : Carte situation de la plaine d’Ain Oussera

Tableau.I.1: Nombre de la population qui occupent la plaine d’Ain Oussera (ONS.2008).

Commune	Population						
	1977	1987	1998	2001	2008	2013	2014
Ain Oussera	27500	46610	82597	92910	147244	182612	189679
Benhar	8200	10329	10380	10695	11749	12864	13087
Birine	14300	19438	26617	29425	40324	49461	51288
El Khemis	1600	2345	4769	4884	8694	12239	12948
Guernini	1900	2172	4038	4198	6556	9307	9857
Had Sahary	9800	15436	22277	24201	39357	52218	54790
Bouirait Lahdab	5500	5957	8897	9194	14113	17877	18629
Total	68800	102287	159575	17550	268037	336578	350278

I.1.2. Géomorphologie

La région d'étude se caractérise par trois individualités géomorphologiques qui sont (Figure.I.2) :

➤ Le massif montagneux au Sud

C'est une série des anticlinaux allongée d'Ouest en Est sur un axe, où ses crêtes s'élèvent brusquement au-dessus du plateau steppique, avec des altitudes variant entre 1000 et 1200 m est formé par Oukat Ghrabi et Chergui Sbaa Rous et Djebel Remila.

➤ La plaine

C'est une surface plate ou modérément ondulée, elle est limitée au Sud par le massif montagneux de Djebel Remila, Sbaa rous et Oukat El Gharbi et Chergui au Nord par les crêtes rectilignes de Koudiat Bou chakeur et Djebel Es sersou et à l'Ouest par Oued Touil. L'altitude de la plaine d'Ain Oussera oscille entre 632m et 900 m et sa superficie est de 3795 km².

➤ Oued Touil

Constitue la limite occidentale de la plaine d'Ain Oussera, il prend sa source dans l'Atlas saharien dans Djebel Ammour. Il traverse les hautes plaines de la wilaya de Laghouat, Djelfa et Tiaret et Médéa, avec une orientation SW_NE jusqu'à le village de Chahbonia pour rejoindre Oued Nahr Ouassel et les affluents d'Oued Feggoussia et continue son écoulement jusqu'à son embouchure dans le barrage de Boughazoul (Mebrouk, 1994).

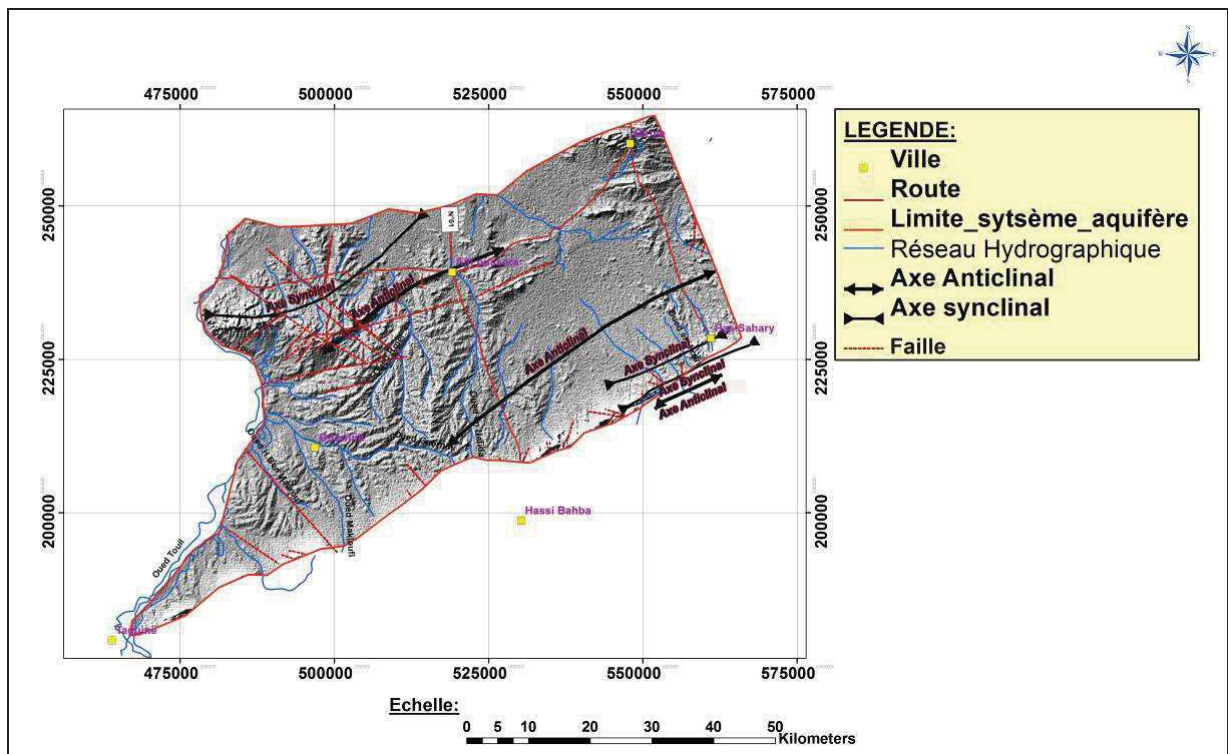


Fig.I.2 : Les unités géomorphologiques de la plaine d'Ain Oussera

I.2. Cadre Géologique

L'Algérie du Nord est structurée en en trois domaines qui sont du Nord vers le Sud (Delga, 1969) :

- **La chaîne alpine d'Afrique du Nord « Chaîne des Maghrébides »** : constituée par des unités allochtones charriées sur la marge africaine, elle fait partie de l'orogénèse alpine périméditerranéenne d'âge Tertiaire qui s'étend de l'Ouest à l'Est sur 2000 km du Rif à la Sicile.
- **Haute plaine** : se situe entre l'Atlas saharien et la chaîne Maghrébines constitué d'une plate forme cratonique recouverte de sédiments méso-cénozoïque d'épaisseur relativement faible, elle large à l'Ouest où elle constitue les Hautes plaines oranaises, par contre à l'Est elle se réduit et se disparaît entre le domaine Tellien et l'Atlas saharien.
- **L'Atlas saharien** : il est composé à l'ouest par les monts de Ksour, Djebel Amour, les monts d'Ouled Nail, au centre par les monts de Ziban et à l'Est par les Aurès. C'est une chaîne intracratonique d'âge Tertiaire orientée Nord-Est - Sud-Ouest, délimitée par deux lignes de fractures : l'Accident Nord-atlasique et l'Accident Sud-atlasique.

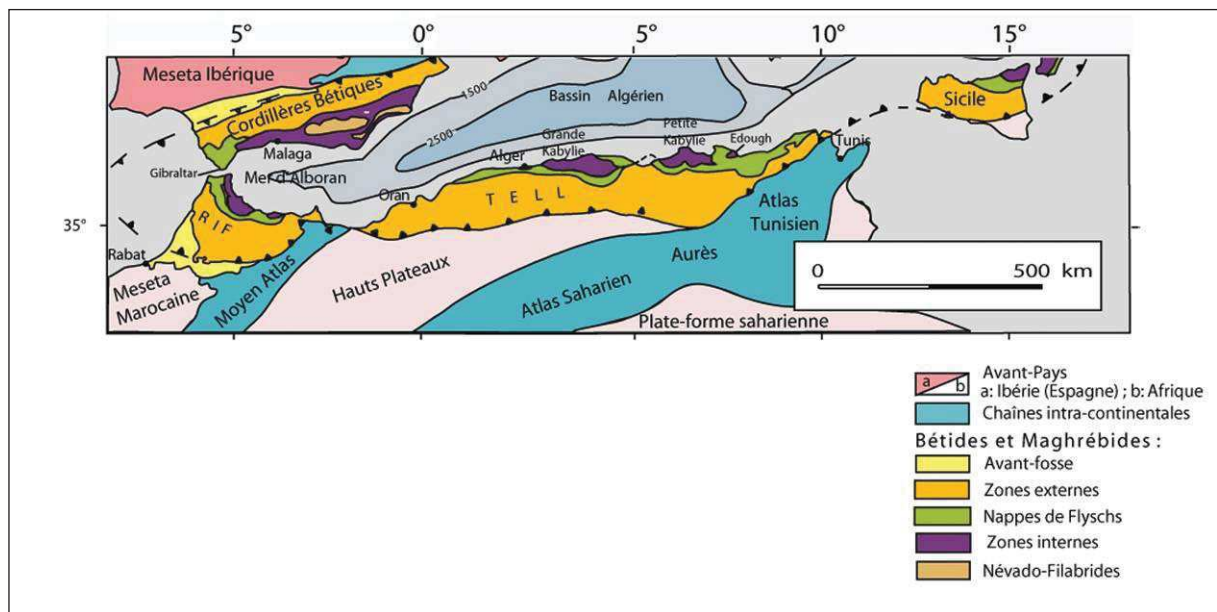


Fig.I.4 : Schéma structural des chaînes alpines de la Méditerranée occidentale (Delga, 1969).

I.2.2. Lithostratigraphie locale de la région d'étude

La plaine de se présente comme un vaste anticlinorium à cœur d'âge Crétacé, compliquée par un système d'anticlinaux, développés sur les versants Sud et Nord (Caratini, 1970) et dont l'axe passerait par Bou Cedraïa. Les dépôts quaternaires recouvrent presque la totalité de la plaine. Sur les flancs Sud et Nord, les formations crétacées affleurent à Koudiat es Seguia, El Fia, El Mouilah, Doghmane et en Nesser (ANRH, 1983).

La série stratigraphique a été déduite à partir des différents forages profonds exécutés dans les régions de Bou Cedraïa 1200 m et El Khrachem 1100 m (voir annexe). Elle fait apparaître les formations illustrées dans la carte géologique, ci-après (Figure I.5). Cette description lithostratigraphie est prise à partir des études antérieures sur la région (Caratini, 1970 ; N.Mebrouk, 1994 ; ANRH, 1983).

I.2.2.1. Trias

Dans la plaine les formations triasiques n'affleurent pas. Elles ont été reconnues à 1300 m de profondeur par le forage de Bou Cedraïa. On reconnaît de bas en haut : une série détritique inférieure (139 m) de grès fins associés à des calcaires marneux et des conglomérats. Puis une série à argiles (270 m) représentée par un mélange formé d'anhydrite, de calcaire à anhydrite, de dolomie et de calcaire. Au - dessus des argiles noires et des calcaires à lamellibranches, puis de l'anhydrite à passées argileuses et enfin des calcaires en bancs, constituant une zone de transition avec le Lias inférieur.

I.2.2.2. Jurassique

Il n'affleure pas dans la région, cependant on reconnaît la série suivante :

➤ Lias

Constitué de bas en haut par une série calcaire récifaux (biolithes), parfois argileux avec à la base de rares bancs de dolomies microcristallines et quelques niveaux de calcaires marneux (300 m). Au-dessus, des marno-calcaires, des marnes, des calcaires plus ou moins marneux et des marnes plus ou moins gréseuses (40 m).

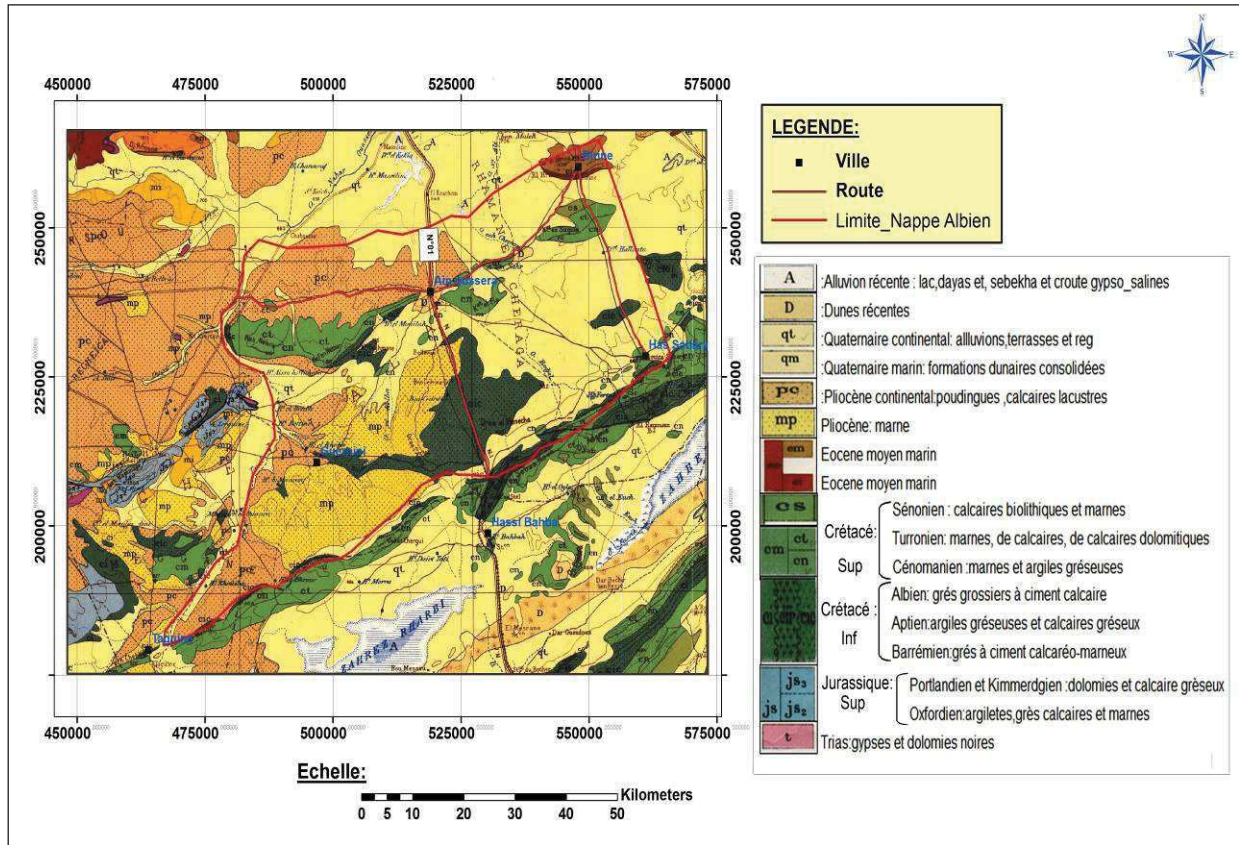


Fig.I.5 : Carte géologique de la plaine d’Ain Oussera, extrait de la carte géologique 1/500 000 de l’Algérie Nord (Flandrin et al, 1951)

➤ Dogger

Les calcaires finement gréseux surmontent des calcaires légèrement argileux : épaisseur (205 m).

➤ Callovo - Oxfordien

Constitué de niveaux détritiques représentés par des grès fins quartzitiques alternant avec des argiles marneuses, et des dépôts d’éléments très fins et durs à ciment marno-argileux. Cette unité détritique présente à sa base de minces bancs de calcaires plus ou moins marneux (750 m).

➤ Oxfordien au Valanginien

Ces formations sont représentées de bas en haut par des marnes argileuses, avec de rares passées calcaires peu épaisses. Cette série est surmontée par des terrains graveleux et calcaires (1950 m).

I.2.2.3. Crétacé inférieur

➤ Néocomien

N’affleure qu’à l’échelle de la zone d’étude. Cependant, traversé par le forage de Bou Cedraïa, celui-ci montre de bas en haut : Des grès argileux, fins avec inclusions de niveaux de grès à ciment calcaire gréseux quartzeux dans la partie moyenne de la formation (200 m).

➤ **Barrémien**

Il apparaît en surface, dans les environs immédiats de la plaine d'Ain Oussera (Djebel Doghmane, El Khatoua), l'oued el bagra, El Mouilah. Vers le Sud, dans la chaîne des Sebaa Rous et à l'Est de la route Alger - Laghouat : Lithologiquement , on distingue de bas en haut : des grés argileux fins, avec dans la partie moyenne de la série deux niveaux de grés à ciment calcaréo-marneux (200 m).

La deuxième série est représentée par des calcaires gréseux avec un pourcentage élevé de quartz.

La troisième série beaucoup plus épaisse (450 m), est constituée par des grés grossiers avec intercalations argilo-marneuses et quelques bancs de calcaires gréseux. Ils présentent le plus souvent une stratification entrecroisée. La granulométrie est variable.

➤ **Aptien**

Il affleure au Sud dans la chaîne des Sebaa Rous, et au Nord autour de l'anticlinal Djebel Doghmane, région de Ben Mekki, oued Mouilah, Drâa Diba. La nature lithologique de l'Aptien ne change pas. En général, la série comprend de bas en haut :

Des grés à ciment calcaire, des calcaires, bancs gréseux avec intercalations de calcaires marneux, puis calcaires avec intercalations d'argiles gréseuses et calcaires gréseux. L'épaisseur de cette formation peut aller jusqu'à 200 m.

➤ **Albien**

Il apparaît au Koudiat Es Siada, Bellevue, Bou Cedraïa, Oued Rmel, Kef Nesser en bordure de la route Ain Oussera - ksar Chellala, et Aïn mouilah. Il est bien visible à 25 Km au Sud d'Ain Oussera, près de Guelt Embarek. Au Sud en bordure de la chaîne de Sebaa Rouss et de la chaîne Guelt es Stel – Taguine, la lithologie de la série reconnue par le forage de Bou -Cedraïa comprend de bas en haut :

- Des grés grossiers à ciment calcaire siliceux avec dans la partie moyenne une intercalation d'argiles.
- Au-dessus, une formation argilo carbonatée épaisse, surmontée par des grés grossiers durs à ciment calcaire.

Ces formations sont affectées par de nombreuses failles. L'épaisseur moyenne de cette formation est estimée à 150 m. L'Albien est proche de la surface voire affleure sur la majeure partie de la zone d'étude, mais plonge en direction du Nord à proximité de la ville d'Ain Oussera car il est affecté par l'anticlinal Doghmane – Khratoua, le forage d'El Krachem atteint ce groupe gréseux à une profondeur de 1018 m.

I.2.2.4. Crétacé supérieur

Il affleure aux Koudiat Es Siada, El fia, El Mouillah, Kef en Nesser et au Sud de Had Sahary, Guelt es Stel, Oukett Gharbi et Chergui, Kef el Bkhour et el Mendjel. On distingue :

➤ **Cénomanién**

Qui couvre de vastes surfaces. Il est constitué par des alternances de calcaire, de calcaire dolomitique de calcaire marneux, des marnes et argiles gréseuses. Son épaisseur varie d'Est en Ouest. Elle passe de 200 - 220 m au chaînon d'Ain Oussera et à Guelt es stel, à 150 m vers Kef El Bkhour et Oukett el Gharbi.

➤ **Turonien**

Son épaisseur varie de 150 m à 100 m d'Est en Ouest, il est représenté par des alternances de marnes, de calcaires, de calcaires dolomitiques constituant des corniches. Le forage d'El Khrachem montre la présence d'une couche d'anhydrite de 02 m

➤ **Sénonien**

Qui affleure à Kef Nesser, Ras en Nokra. Il est constitué par des alternances de calcaires biolithiques, parfois oolithiques et de marnes. Son épaisseur est de 450 m.

I.2.2.5. Eocène

Formé par des calcaires à Numulites, des calcaires marneux et des marnes gypseuses. Ces formations sont présentes dans la région de Birine où elles sont masquées par le Quaternaire.

➤ **Miocène**

Le Miocène affleure à l'Ouest d'Ain Oussera à Bled Boudoumia et Negar Zeïna. Il est constitué essentiellement par des marnes gréseuses et des argiles, ainsi que des passages de grés et de calcaires tels qu'ils ont été reconnus par le forage d'El Khrachem. Son épaisseur est de 172 m.

➤ **Quaternaire**

Sur la majeure partie de la plaine, un encroutement calcaire recouvre les grandes étendues planes. Il se développe au-dessus des formations gréseuses perméables. Son épaisseur est souvent supérieure au mètre. Les alluvions modernes, localisées dans les vallées des oueds, sont composées de sables limoneux, d'argiles plus ou moins sableuses et de galets. On y rencontre une nappe superficielle sollicitée par de nombreux puits.

I.2.3. Contexte structural de la région d'Ain Oussera

Le cadre structural du domaine sur lequel s'étend la plaine d'Ain Oussera comporte (figure.I.6) :

Au centre un vaste anticlinal à cœur plat (domaine de la plaine) constitué de formations crétacées dont l'axe de direction NEE-SWW, passe par le Djebel Touil à l'Est et Kouba Sidi Aïssa à l'Ouest. Cette structure, est compliquée au Nord et au Sud par des structures de second ordre. A l'Ouest d'Ain Oussera, on observe un anticlinal constitué par les Koudiats Doghmane et Khratoua dont les formations appartiennent au crétacé inférieur. La pente du flanc Nord est beaucoup plus accentuée que celle du flanc Sud où les pendages sont de l'ordre de 15° à 30° alors qu'au Nord ils varient de 40° à 50° (Caratini, 1970).

L'axe de la zone anticlinal n'est pas visible sur le terrain, et se déduit des pendages qui s'inversent de part et d'autre d'une ligne de direction NEE- SWW. A l'Est du Koudiat Doghmane, les formations de l'Aptien amorcent la fermeture du périclinal pour ensuite l'abandonner et reprendre des pendages orientés vers le Nord. Plus à l'Est, dans la région de Birine, les terrains Eocènes sont affectés d'une structure en écaillés, avec des accidents secondaires. Au Sud une faille mise en évidence par la prospection géophysique, sépare les affleurements Aptiens au Nord et Cénomaniens au Sud. Cette faille se prolonge jusqu'au Koudiat el fia, où l'on distingue un accident de direction Est - Ouest séparant les corniches Cénomano - Turoniennes.

De Guelt Esstel à Had Sahary, la structure principale est représentée par l'anticlinal de Khreidzer, encadrée par des failles obliques. A l'Ouest, et jusqu'à Taguine, s'étend une « cuesta » qui constitue le flanc Sud de la large zone anticlinale, se prolongeant jusqu'au chaînon d'Ain Oussera.

Au Sud, une faille importante (Ras ben Chouil - Ain El Hammam), traverse de part et d'autre le plateau Cénomaniens, formé par les Kef er Rguiba, El feïdja et le synclinal El Mendjel à cœur Turonien. Au Nord - Ouest de la plaine, on observe également une structure anticlinale Barémo-Hautérvienne traversée par une faille NEE-SWW. D'une manière générale, plis et accidents sont orientés approximativement selon une direction Atlasique N55°E à N60°E.

La coupe géologique présentée en figure I.7 ci-après, orientée NNE-SSE, met en évidence la structure globale de la plaine d'Ain Oussera.

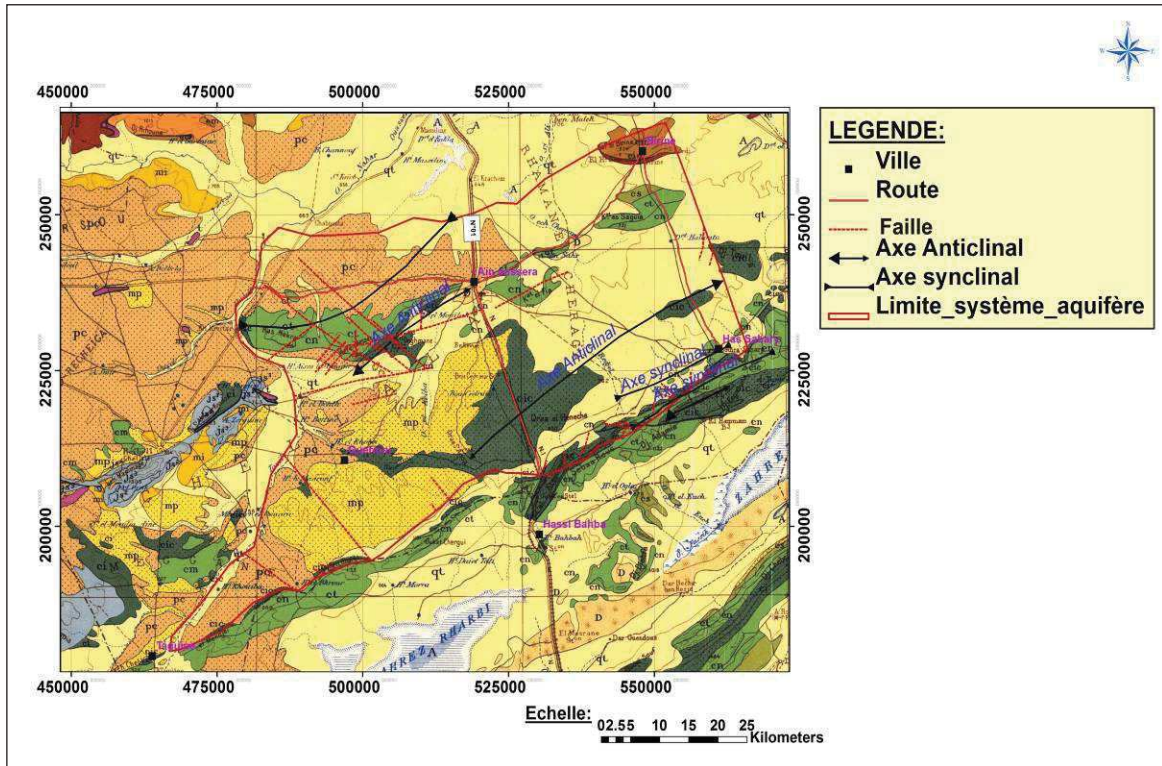


Fig.I.6 : Carte structurale de la plaine d'Ain Oussera (Extrait de la carte géologique de l'Algérie du Nord au 1/500 000)

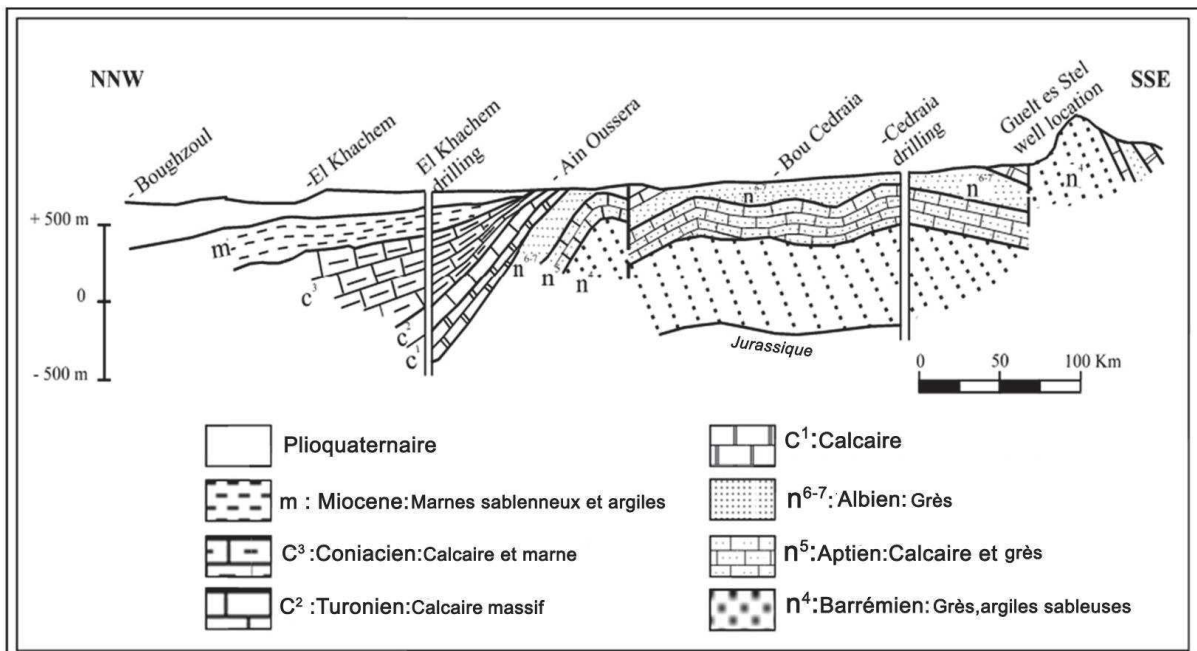


Fig.I.7: Coupe géologique schématique de la plaine d'Ain Oussera (Bechtel, 1977)

I.2.4. Synthèse géophysique

La première étude géophysique par prospections par sondages électriques (Tableau I.2) a été menée en 1976 par l'entreprise STROJEXPORT PRAGUE. Quant à la seconde étude, elle a été réalisée par la société nationale de la géophysique ALGEO en 1980. Ces études ont été fondées sur la mesure de la résistivité des formations géologiques et ont permis de déterminer leurs épaisseurs des horizons du Crétacé inférieur ; de l'Albien gréseux, Mio-Pliocène, et Quaternaire, afin de mieux comprendre la structure du sous-sol, et localiser les zones aquifères les plus favorables à l'implantation des forages (Fig.8).

Tableau.I.2: Nombre des sondages réalisés

Etude	AB (1000m)	AB (2000m)	AB (4000m)	AB (6000m)	Equidistance entre S.E (Km)	Nombre des profils
ALGEO	60 S.E	80 S.E	30 S.E	40 S.E	2.5	19
Total	210 sondages électriques					
STROJEXPORT PRAGUE	/	57 S.E	36 S.E	33 S.E	2	08
Total	126 sondages électriques					

I.2.4.1. Interprétation des résultats (Etude ALGEO.1980)

L'interprétation de l'ensemble des sondages électriques effectués ont permis d'établir 19 coupes géoélectriques, la signification géologique (étalonnage) des milieux géoélectriques y mise en évidence grâce aux forages Taguine Sud et Bou Cedraia (annexe).

➤ Les coupes géoélectriques

D'orientation NW-SE, couvrent la partie Est de la plaine. La formation albienne dans cette partie se trouve près de la surface. Cette zone constituée le cœur de l'anticlinal principal. A limite Nord l'albien se manifeste comme une couche résistante caractérisée par des valeurs comprises entre 70 et 300 Ohm.m, elle est couverte par une croûte de calcaire très résistante, et par le remplissage du plio-quaternaire (310 à 1400 Ohm.m), par contre dans la limite sud des profils la formation conductrice du cénonanien qui y affleure (voir annexes)

Sur la majorité des coupes les formations de l'Albien se trouvent directement près de la surface, il est couvert par un horizon résistant du Miopliocène. Au Nord il submerge sous le recouvrement du cénonanien et le Turonien. Les valeurs de la résistivité de l'albien sont relativement élevées, elles variées entre 90 et 220 Ohm.m. L'épaisseur moyenne de l'albien est de 150 m (voir annexes)

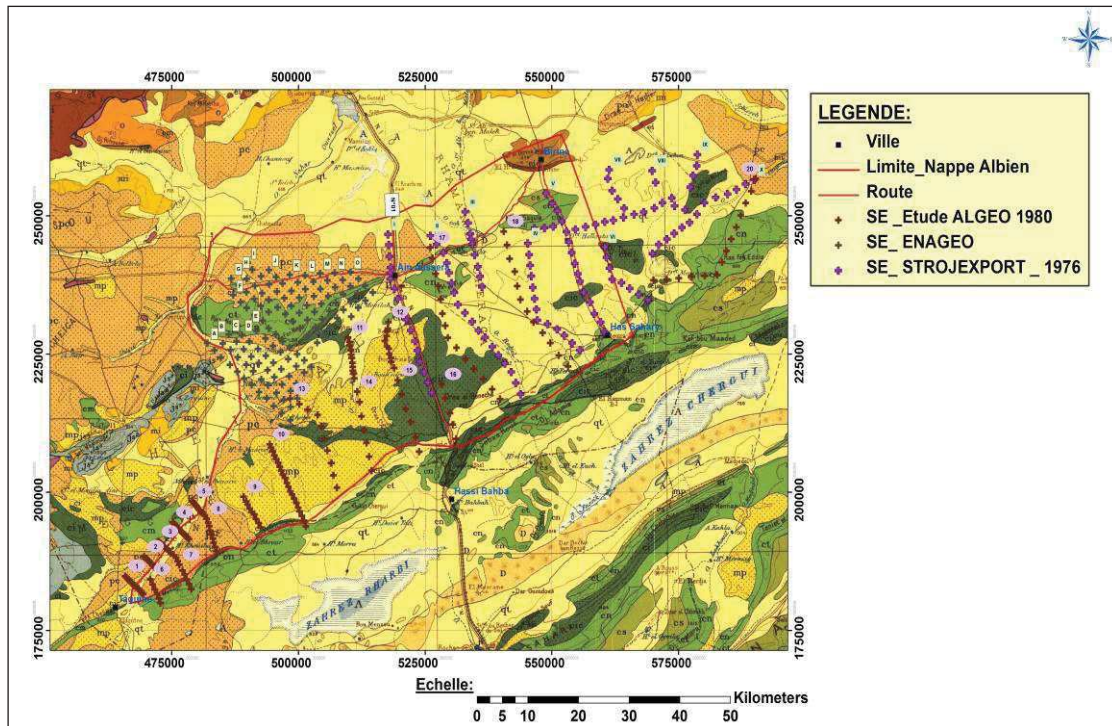


Fig.I.8 : Carte positionnement des sondages électriques

I.2.4.2. Interprétation des résultats (Etude de STROJEXPORT PRAGUE.1976)

Cette coupe géoélectrique est réalisé sur le l'axe de la route reliant Guelt Esstel et la ville d'Ain oussera (Fig.I.9). La formation de l'Albien se manifeste comme une couche géologique résistante caractérisée par des résistivités variées entre 80 et 400 Ohm.m, recouverte par une mince couche de croute de calcaire du Quaternaire. Au niveau du SE11 on rencontre une résistivité faible (36 Ohm.m) est qui revienne probablement à la présence des éléments argileux. Au Nord (SE9) l'Albien plonge sous un angle de 06° environ, et il est recouvert par le cénonanien et le Turonien. Cette zone est le cœur de l'anticlinal principal dont le flanc Nord est observé au niveau de SE9. Plus loin au Nord (SE6) l'Albien plonge sous un angle de 08° environ à cause d'une grande faille inverse jusqu'à une profondeur de 1000m (Forage El Khrachem le toit de l'Albien est à 1025m de profondeur). Au bout sud le toit l'Albien est près de la surface, il est partiellement érodé. On observe aussi, un changement de faciès (entre le SE15 et 17), les valeurs de la résistivité sont élevés, qui peut être expliqué par la consolidation des grès.

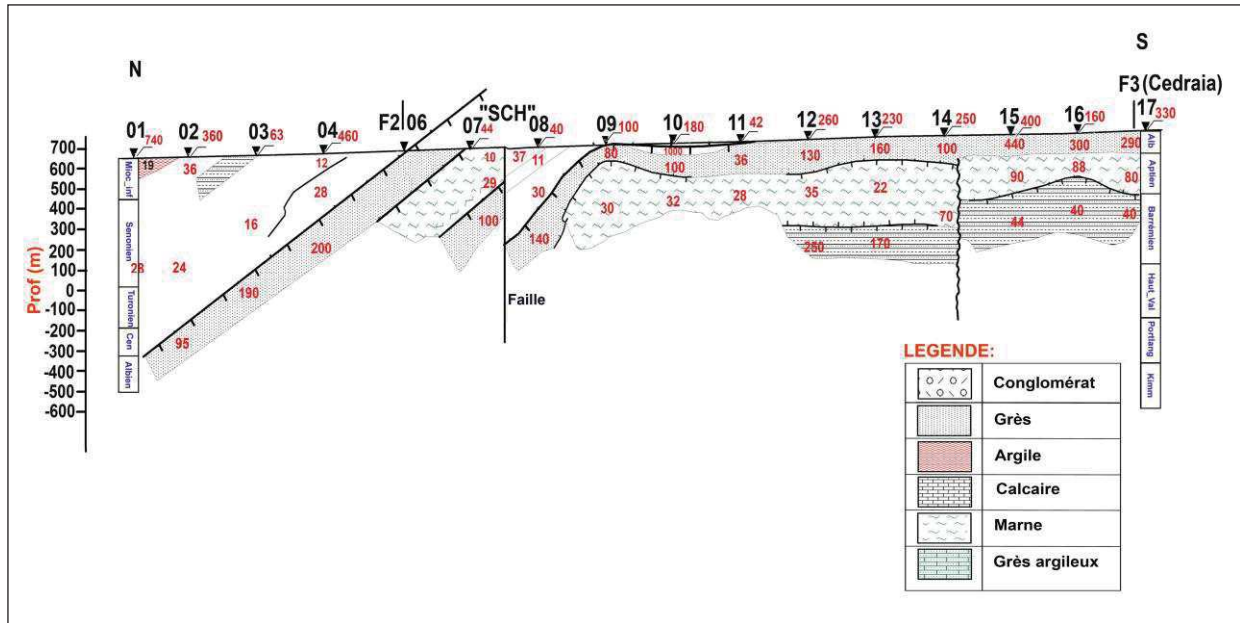


Fig.I.9 : Coupe géoélectrique de la région Ain Hidjel-Ain Oussera (STROJEXPORT PRAGUE, 1976)

I.3. Conclusion

La plaine d'Ain Oussera couvre une superficie de 3795 km² formant une bande allongée Est – Ouest d'environ 110.2 km de longueur et 46 km de largeur entre la ville de Birine et Taguine, les altitudes moyennes de la plaine d'Ain Oussera oscille entre 632m et 900 m.

La combinaison de l'outil géologique et géophysique ont permis de dégager ce qui suit :

- La plaine d'Ain Oussera se présente comme une vaste anticlinal à cœur plat, son axe passe par djebel Touil à l'Est, et Bou Cedraïa, Koudiat sidi Aissa à l'Ouest.les flancs de cet anticlinal ont un pendage modéré de l'ordre de 10°.
- La région d'étude se caractérise par des terrains sédimentaires, allant du Néocomien à la base jusqu'au Quaternaire.
- Les formations qui constituent un intérêt hydrogéologique dans la plaine sont :
 - Les dépôts grossiers du remplissage Plio-Quaternaire.
 - Les Calcaires fissurés du Turonien.
 - Les calcaires à silex du l'Eocène inférieur qui affleurent au niveau au Nord de la ville du Birine.
 - Les grès à ciment calcaire de l'Albien inférieur, et qui se caractérise par une épaisseur variée entre 83 et 225m et une résistivité comprise entre 50 à 200 Ohm.m. Les grès de l'Albien constituent un bon réservoir il présente de bonnes possibilités d'exploitation surtout dans les endroits où ils s'affleurent.

CHAPITRE II

HYDROCLIMATOLOGIE

II. Introduction

Le climat joue un rôle essentiel dans la morphologie du relief, sur la végétation, la genèse et le type des sols et sur les activités agricoles.

L'objectif principal de toute étude climatologique est l'établissement pour une période donnée un bilan hydrique dont les paramètres principaux nécessaires à son établissement sont : la précipitation et la température.

Le climat algérien est caractérisé par sa grande variabilité de précipitations et des températures annuelles, cette variation est due essentiellement aux irrégularités topographiques et aux influences opposées de la Méditerranée et du Sahara.

Dans ce chapitre, on va analyser les facteurs climatiques et ressortir les régimes pluviométriques à savoir la période humide et la période sèche et le type de climat caractérisant la région d'étude. Les objectifs majeurs de notre étude étant de synchroniser les éléments du bilan d'eau dans la plaine. Les facteurs mesurés (Pluviométrie, Température) sont indispensables et leur connaissance permet de quantifier la recharge de la nappe souterraine qui constituera un des termes d'entrée du modèle.

Notre étude sera basée sur les données recueillies auprès de sept stations citées ci-dessous

Tableau.II.1 : Caractéristiques des stations pluviométriques (ANRH, 2013)

Station	Z (m)	Coordonnées		Période d'observation	Equipement
		X.Lamb	Y.Lamb		
Ain Oussera	690	518,5	239,3	1914-2011	Pluviomètre
Had Sahary	830	560,75	228,65	1967-2011	Pluviomètre
Birine	745	547,30	259,00	1985-2007	Pluviomètre
Guelt Esstel	918	529,0	207,75	1914-1979	Pluviomètre
Ksar Challala	850	465,40	212,80	1985-2007	Pluviomètre
Zmalet El Amir A.E.K	850	464,20	177,75	1980-2004	Pluviomètre
Chahbounia	665	491,30	249,35	1980-2004	Pluviomètre

II.1. Etude des paramètres climatiques

Pour l'estimation des valeurs moyennes des ces principaux paramètres, nous disposons uniquement des données météorologiques de la station d'Ain Oussera (période 1991-2011). En ce qui concerne les précipitations, les données des sept stations pluviométriques sont disponibles au niveau du service hydrologie, ANRH (tableau. II.1).

II.1.1. La pluviométrie

La précipitation est un facteur fondamental pour caractériser le climat d'une région. Ce terme précipitation désigne des cristaux de glace ou des gouttelettes d'eau qui, ayant été soumis à des processus de condensation et d'agrégation à l'intérieur des nuages, sont devenus trop lourds pour demeurer en suspension dans l'atmosphère et tombent au sol.

II.1.1.1. Répartition interannuelle de la précipitation

L'analyse des données pluviométriques annuelles au niveau des différentes stations montre ce qui suit :

- **Station Ain Oussera (1914/2011)**

Le graphe (Fig.II.1) montre qu'il y'a une irrégularité de la répartition de la précipitation durant la période d'observation 1914/2011.

L'année la plus pluvieuse est celle de 1951 avec 510 mm/an, alors que la valeur minimum est observée en 1953 avec 76 mm/an. La moyenne annuelle de la série est 231.14 mm/an.

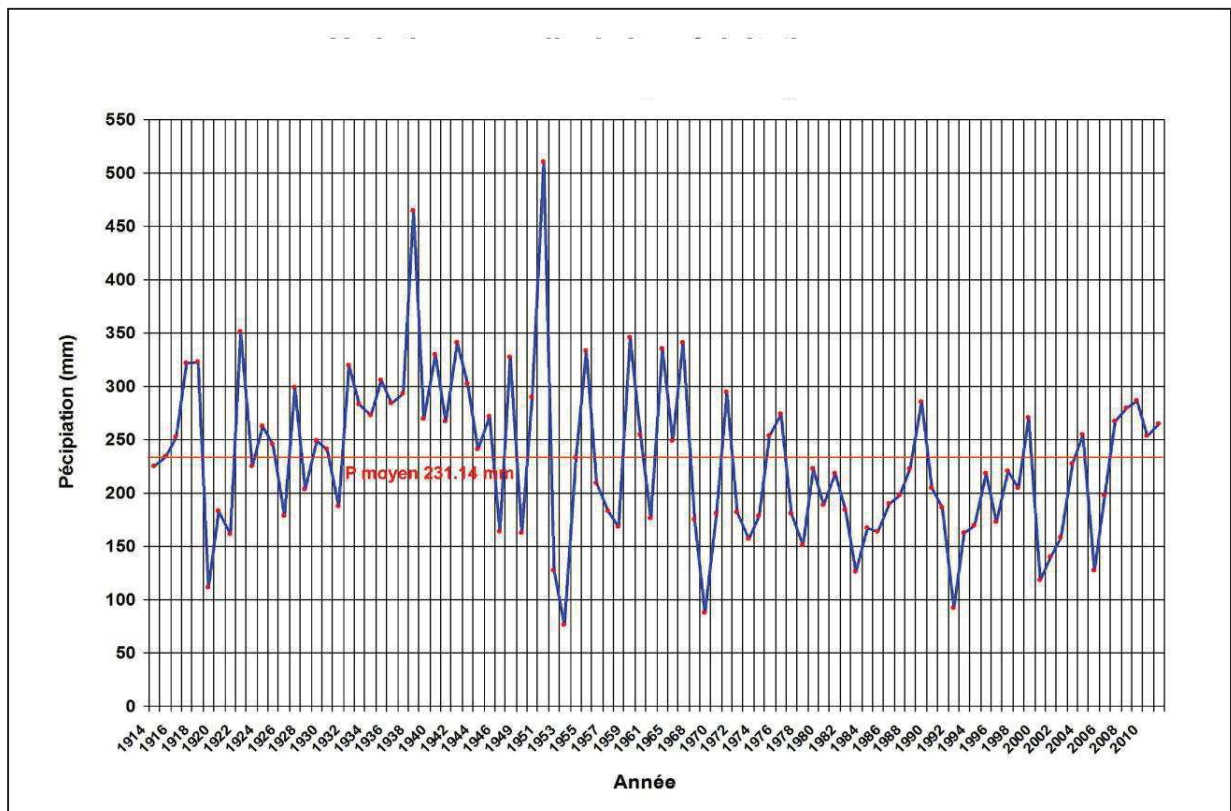


Fig.II.1: Variation annuelle de la précipitation_ Station Ain Oussera (1914-2011)

- **Station Guelt Esstel (1914/1979)**

Le régime interannuel est très irrégulier durant la période d'observation. L'année la plus pluvieuse est celle de 1938 avec de 569 mm/an, par contre l'année la moins pluvieuse est 1948 avec une hauteur de précipitation de 77 mm/an. La moyenne annuelle de la précipitation est de 297.6 mm/an (Fig.II.2).

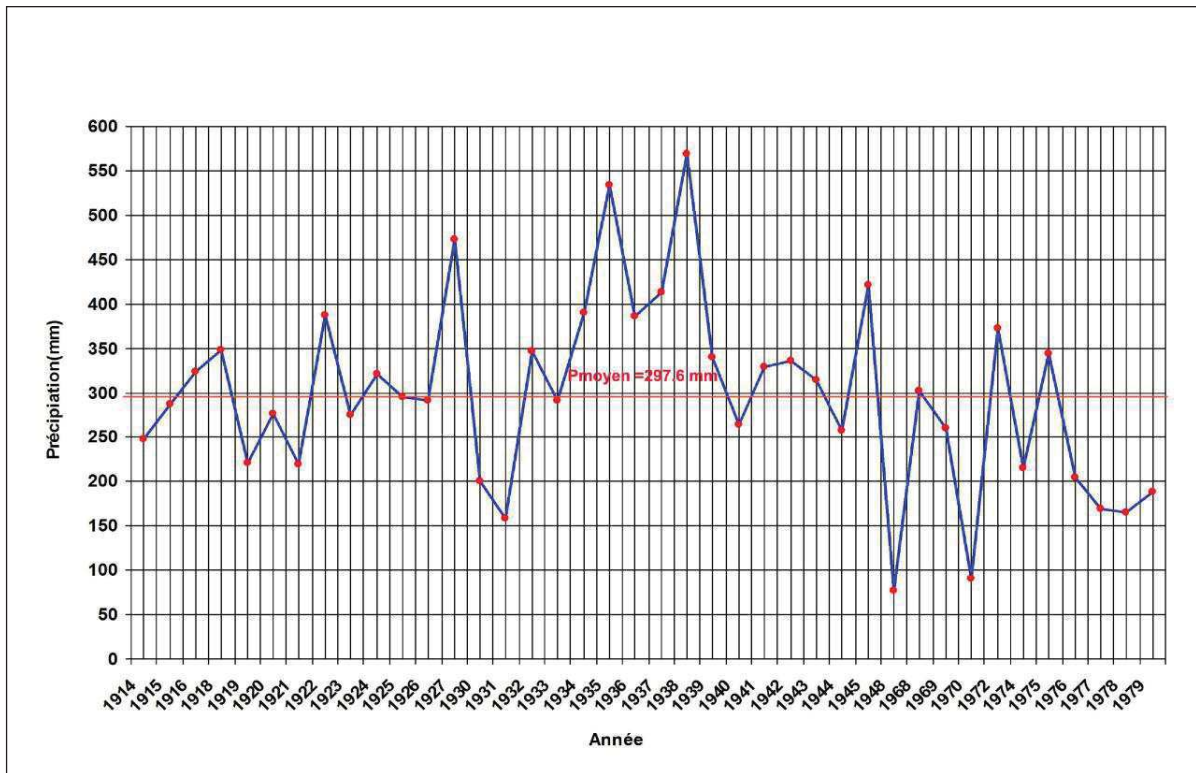


Fig.II.2:Variation annuelle de la précipitation_ Station Guelt Esstel (1914-1979)

- **Station Had Sahary (1967/2011)**

Le graphe (Fig.II.3) montre la même évolution de la pluviométrie, la valeur maximum est enregistrée en 1991 avec 420 mm/an, alors que la valeur minimum a été enregistrée en 1976 avec 61 mm/an. La moyenne annuelle de la précipitation est de 227.9 mm/an.

- **Station Ksar Chellala (1985/2007)**

Les hauteurs annuelles des précipitations pour la période 1995-2007 varient de 51.6 mm en 1985 à 404 mm en 2006, La moyenne annuelle de la précipitation est de 214.9 mm/an (Fig.II.4).

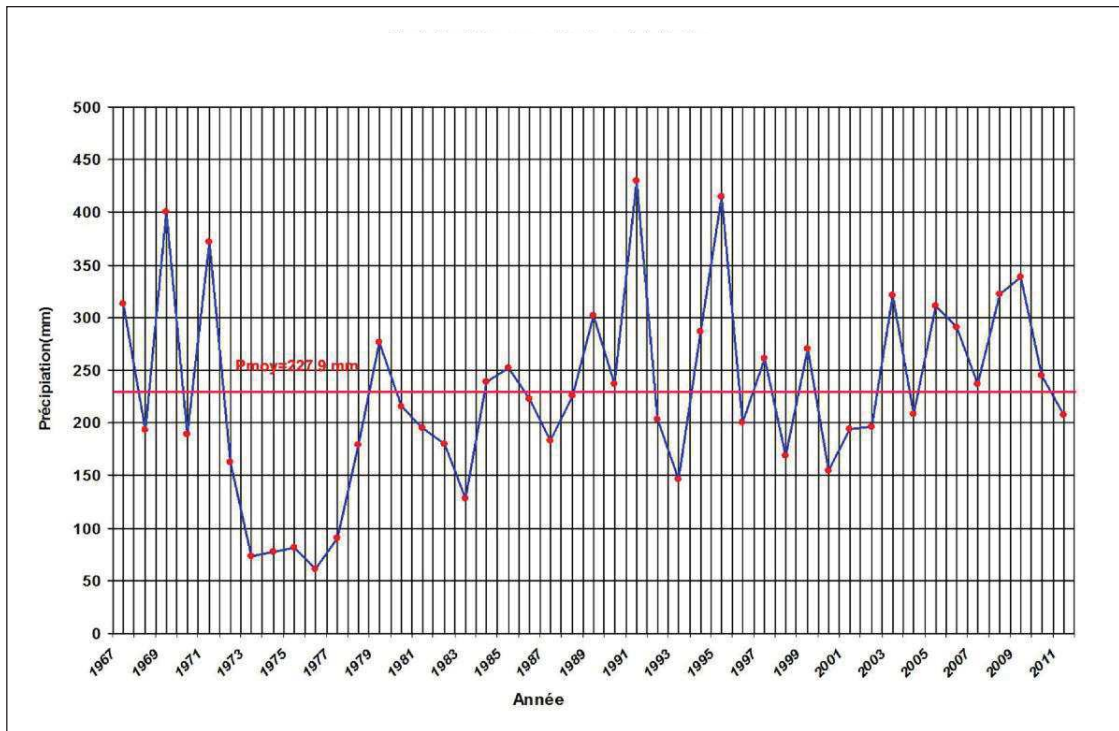


Fig.II.3:Variation annuelle de la précipitation_ Station Guelt Esstel (1967-2011)

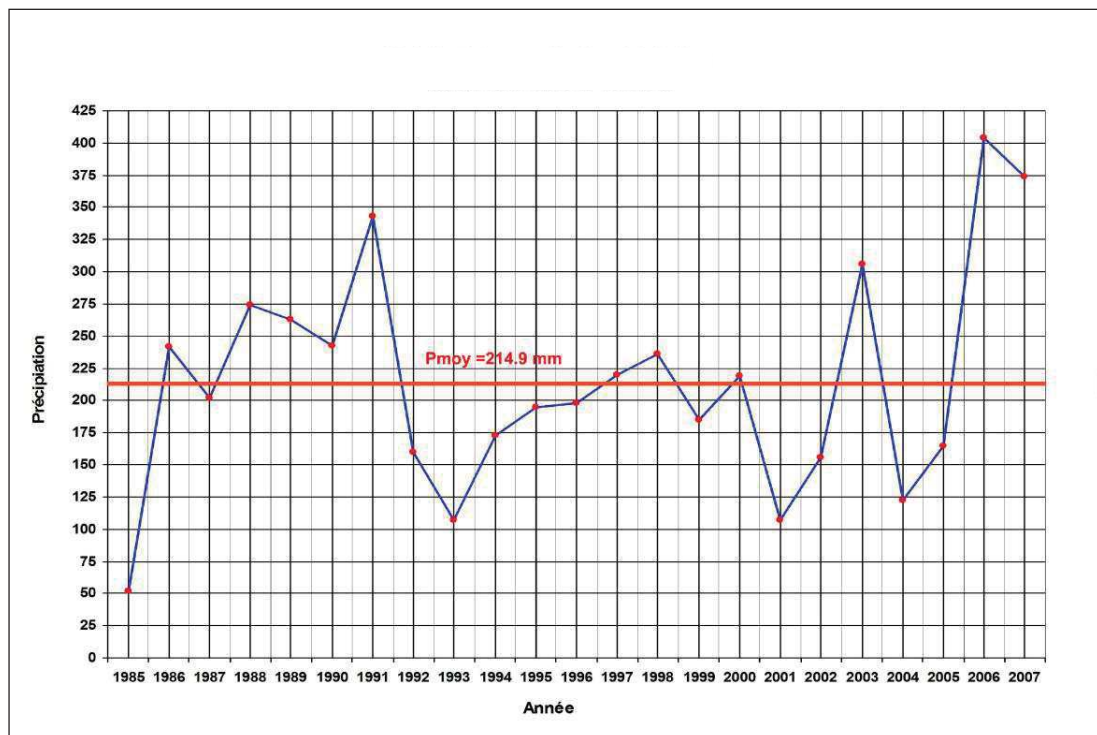


Fig.II.4:Variation annuelle de la précipitation_ Station Ksar Chellala (1985/2007)

II.1.1.2. Répartition mensuelle moyenne de la précipitation

Les précipitations mensuelles moyennes calculées pour 07 stations sont présentées au tableau ci-après.

Tableau.II.2: Les précipitations moyennes mensuelles de la plaine d'Ain Oussera (ONM).

Station/ Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Annuel
Ain Oussera	21.54	25.7	22.0	20.2	22	17.16	21.6	24.1	27.8	15.5	5.14	8.4	231.14
Guelt Esttel	29.6	28.8	35.0	29.2	29.2	23.6	26.6	26.1	35.7	19.6	4.3	10.1	297.6
Had Sahary	25.1	25.8	22.0	18.8	20.7	17.8	20.1	25.4	26.7	11.1	6.6	7.8	227.9
Ksar Chellala	23.4	23.0	19.9	21.0	19.3	16.5	17.7	17.5	26.9	10.2	9.8	9.9	214.9
Zmalet AEK	5.6	13.9	11.0	19.5	5.7	6.3	9.4	12.8	12.9	5.0	0.3	4.0	106.5
Birine	24.2	24.4	20.9	19.9	20.0	17.1	18.9	21.5	26.8	10.6	8.2	8.9	221.0
Chahbounia	12.6	17.5	15.5	20.8	15.5	13.1	12.6	14.2	13.9	6.1	1.2	3.1	147.1

L'analyse des données pluviométriques des moyennes mensuelles au niveau des différentes stations montre ce qui suit :

- **Station Ain Oussera (1914– 2011)**

La valeur maximale de précipitation est observée au mois d'Avril avec 27.8 mm, alors que la valeur minimale est observée au mois de Juillet avec 8.4 mm. la période sèche allant de Juillet à Août.

- **Station Guelt Esstel (1914/1979)**

La répartition la précipitation moyen mensuelle au niveau de la station Guelt Esttel est irrégulière. Le mois d'Avril est le plus arrosé avec 35.7mm et le mois le plus sec est juillet avec une hauteur de précipitation de 4.3mm.

- **Station Had Sahary (1967/2011)**

Le mois le plus pluvieux est le mois d'avril avec une valeur de 26.7mm, par contre le mois le moins pluvieux est Juin avec 6.6mm. Notant que la période sèche aille de Juillet à Août.

- **Station Ksar Chellala (1985/2007)**

La valeur maximum de la précipitation est enregistrée au mois de Mai avec 26.9mm, par contre la valeur minimum est observée au mois de Juillet. La période sèche dans la région de ksar Chellala va du mois de juin jusqu'au mois d'Août.

- **Station Zmelt El Ami AEK (1980-2004)**

La variation de la précipitation moyenne mensuelle est marquée par une irrégularité très importante durant toute l'année. L'écart entre les hauteurs de la précipitation est élevé.

La valeur maximale est observée au mois de Décembre avec 19.5 mm et la valeur minimale est observée au mois de Juillet avec 0.3 mm. La période sèche débute au mois de Juin et se continue jusqu'au mois de Septembre.

Station Birine (1985-2007)

Le mois le plus pluvieux dans la région de Birine est le mois de Mai avec une valeur de 26.8mm, alors que le mois le plus sec est le mois de Juillet avec 8.2mm. Notant que la période sèche aille de Juin à Août.

Station Chahbounia (1980-2004)

Le mois le plus pluvieux est le mois de Décembre avec 20.8mm, par contre le mois le plus sec est le mois de Juillet avec 1.2 mm. La période sèche va de Juin jusqu'à Aout.

II.1.1.3. Répartition de la précipitation saisonnière

Les valeurs des précipitations saisonnières pour les différentes stations sont reportées au tableau tableau.II.2.

Les données du tableau.II.2 et le graphe (Fig.II.5) montrent que :

- La saison sèche est l'été pour les différentes stations, le pourcentage de la précipitation tombée durant cette saison variée entre 8.73 et 13.91%.
- La saison pluvieuse est l'automne pour les stations de Guelt Esttel, Birine, Had Sahary et Ksar Chellala, par contre pour la station d'Ain Oussera et Zmelt el Amir abd el Kader c'est le printemps. Dans la station de chahbonia c'est la saison de l'Hiver qui est la plus pluvieuse avec un pourcentage de 33.58% de la quantité totale de la lame d'eau précipitée.

Tableau.II.3: Répartition des hauteurs de la précipitation saisonnière

Station	Automne	P%	Hiver	P%	Printemps	P%	Eté	P%
Ain Oussera	67.9	29.37	59.9	25.91	75.7	32.75	30	12.97
Guelt Esstel	93.4	31.38	82	27.55	88.4	29.73	34	11.42
Had Sahary	72.9	31.98	57.3	25.14	72.2	31.68	25.5	11.2
Ksar Chellala	66.3	30.85	56.8	26.43	62.1	28.89	29.9	13.91
Zmalet AEK	30.5	28.63	31.5	29.57	35.1	32.95	9.3	8.73
Birine	69.5	31.44	57	25.79	67.2	30.4	27.7	12.53
Chahbounia	45.6	30.99	49.4	33.58	40.7	27.66	10.4	7.07

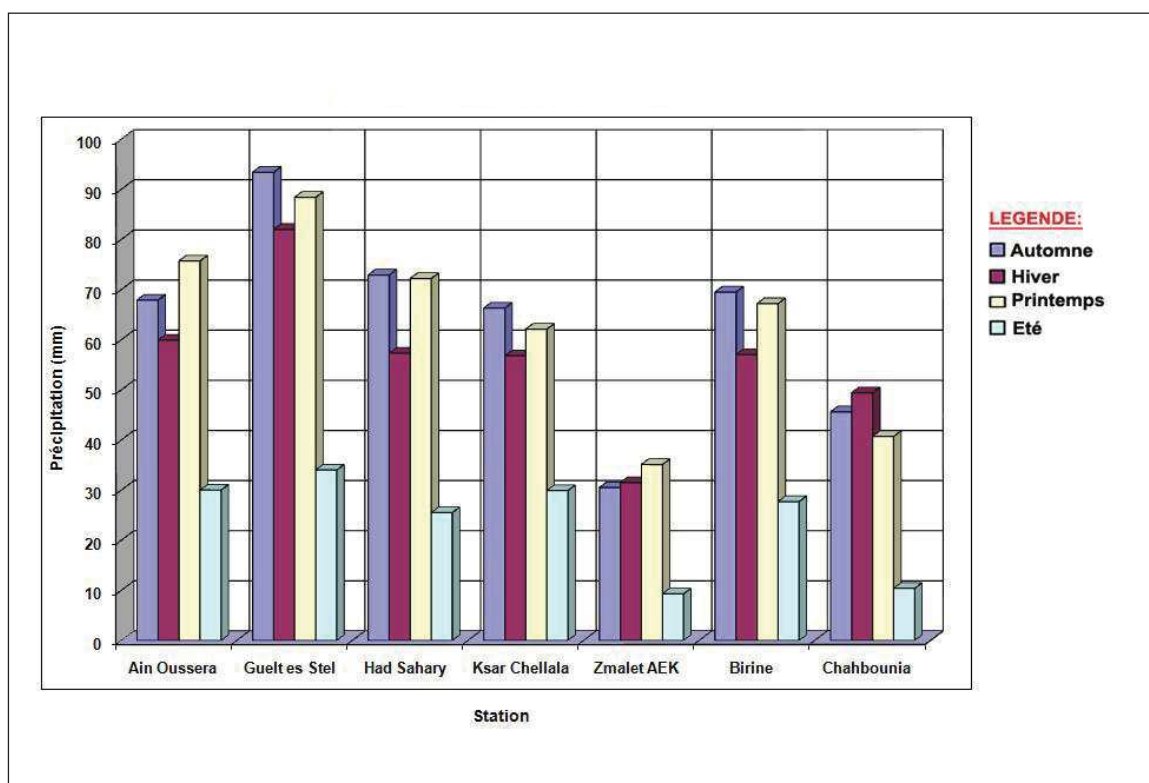


Fig.II.5 : Variation saisonnière de la précipitation dans la plaine d'Ain Oussera

II.1.1.3. Evaluation de la lame d'eau moyenne annuelle précipitée sur la plaine d'Ain Oussera

La lame d'eau moyenne c'est la quantité de pluie moyenne précipitée sur une zone et pendant une période définie. Il existe quatre méthodes pour calculer la moyenne pluviométrique d'une région.

- La moyenne arithmétique.
- La méthode de Thiessen.
- La méthode analytique.
- La méthode des isohyètes.

Pour l'évaluation de la lame d'eau moyenne annuelle précipitée, on va utiliser les données des 7 stations mentionnées dans le tableau.II.1.

➤ **Méthode de la Moyenne arithmétique**

C'est la méthode la plus rapide ; elle consiste à calculer la moyenne arithmétique des précipitations observées à chaque station. Cette méthode accorde une grande importance aux valeurs extrêmes. Son efficacité est meilleure pour de petits bassins où l'influence de l'altitude, de l'exposition et de la latitude sur les précipitations est partout identique (ROUABHIA, 2006).

C'est la moyenne arithmétique de « n » poste, intéressant une surface, peut être une estimation valable de la lame d'eau tombée sur une surface (Sari, 2002).

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$$

Avec

P_i : précipitation moyenne annuelle au poste i en mm

N : nombre des postes pluviométriques.

Tableau.II.4: Précipitation moyenne annuelle aux différentes stations

Station	Ain Oussera	Guelt Esstel	Had Sahary	Ksar Chellala	Zmalet AEK	Birine	Chahbounia
<i>P_i (mm)</i>	231.14	297.6	227.9	214.9	106.5	221.1	147.1

Le calcul nous donne une lame d'eau précipitée de l'ordre de 206.60 mm.

➤ **Méthode des isohyètes**

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

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

Cette méthode est inutilisable dans la région puisque actuellement le nombre de stations ne permet pas un planimétrie convenable. La carte d'isohyète de la pluviométrie a été tracée par logiciel Arc Gis (Fig.II.6).

Tableau.II.5: Répartition de la précipitation moyenne en fonction des surfaces

Isohyètes (mm)	P moyennes (mm)	Surface en (km ²)	Précipitation (10 ⁻⁶ Km ³)
120 - 150	135	31	4185
150 - 175	162.5	161	26162.5
175 - 200	187.5	406.45	76209.37
200 - 225	212.5	958.35	203649.37
225 - 250	237.5	1383	328462.5
250 - 275	262.5	667.2	175140
275 - 300	237.5	188	44650
Total		3795	858458.74

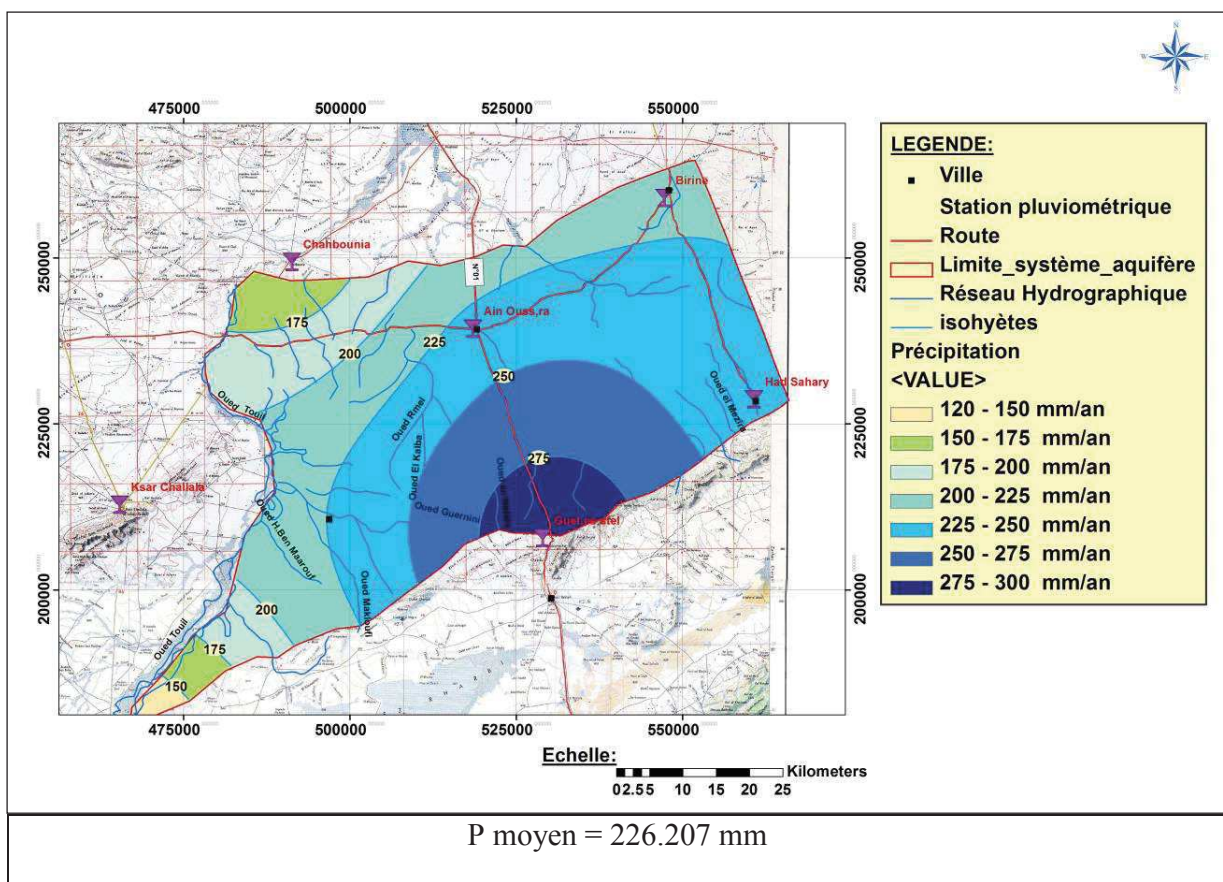


Fig.II.6 : Carte des isohyètes pluviométriques de la plaine d’Ain Oussera

➤ **Moyenne de THIESSEN**

C’est la méthode la plus adoptée pour la présente étude, les surfaces d’influences (polygones) pour chaque station sont déterminées grâce au réseau de médiatrices des segments joignant les postes deux à deux. Chaque surface partielle est affectée de la hauteur annuelle moyenne de la station concernée,

la somme des volumes d'eau précipités au niveau de chaque polygone sera divisée par la surface totale du bassin versant pour obtenir ainsi la lame d'eau tombée. Les polygones de thiesen sont tracés par logiciel Arc Gis (Fig.II.7).

Tableau.II.6: Répartition de la précipitation moyenne en fonction des surfaces

Station	P _i (mm)	S _i surface Polygone (km ²)	P _i * S _i *10 ⁻⁶ (km ³)
Ain Oussera	231.14	1052.523	243280.166
Birine	221	466.267	103040.587
Had Sahary	227.9	505.48	114966.434
Ksar Challala	214.9	326.80	70162.0563
Zmelt El Ami AEK	106.5	155	16507.5
Guelt Esstel	297.6	802.65	238617.168
Chahbounia	147.1	486.28	71516.9309
Total		3795	858090.842

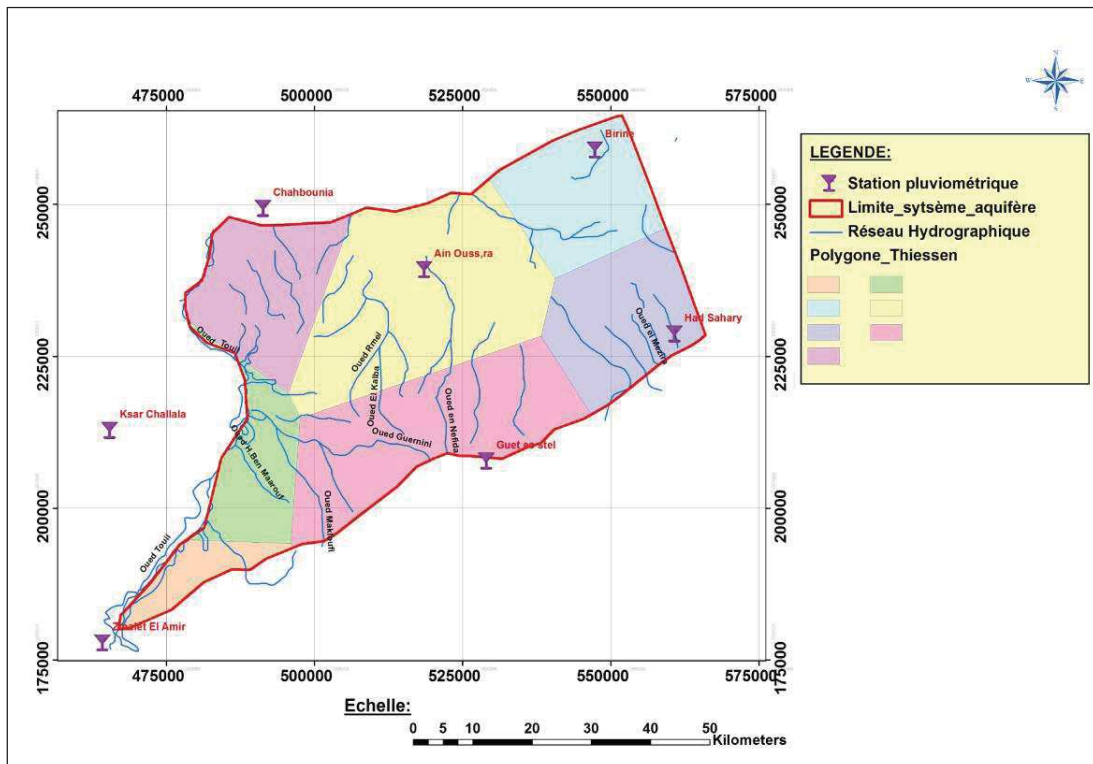
$$P = \frac{\sum P_i * S_i}{\sum S_i} = 226,11\text{mm}$$


Fig.II.7 : Carte des polygones de thiesen de la plaine d'Ain Oussera

➤ **Comparaison des résultats**

Les résultats de calcul de la lame d'eau précipitée portés au tableau ci-dessous montrent ce qui suit :

- ❖ La méthode de Thiessen et des isohyètes ont donné des valeurs presque identiques.
- ❖ La lame d'eau précipitée calculée par la méthode arithmétique est sous estimée.

Tableau.II.7: Résultats de calcul de la lame d'eau moyenne annuelle précipitée

Méthode Arithmétique	Méthode Isohyètes	Méthode Thiessen
206.60 mm	226.207 mm	226.11 mm

La pluviométrie moyenne annuelle dans la plaine d'Ain Oussera est de 226.15 mm (C'est la moyenne entre la méthode de Thiessen et la méthode des Isohyètes).

II.1.2. La Température

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

Nous disposons des données mensuelles de la station d'Ain Oussera pour une période allant de 1991 à 2011.

Tableau.II.8: Variation des températures moyennes mensuelles (ONM)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Moyenne annuelle
T°C min	16.6	11.7	6	2.6	1.6	2.8	5.2	8.3	13	17.5	21.5	21	10.6
T°C max	29.7	24.5	18	13	12.8	14.6	18.9	21.8	27.6	33.8	37.7	36.3	24.1
T°C moy	22.7	17.8	12.2	10.7	6.5	11.5	11.8	14.1	20	25.9	29.7	29.2	17.6

II.1.2.1. La Température moyenne mensuelle

L'analyse des données de la température mensuelle moyen montre que le mois du Janvier est le mois le plus froid de l'année avec une valeur de 6.5 °C, alors que le mois le plus chaud est Juillet avec une valeur de 29.7°C.

L'allure du graphe (Fig.II.8) de la température montre que la température décroît à partir du mois d'octobre septembre et continue jusqu'au mois de février, l'augmentation des températures reprend et atteint son maximum au moins de Juillet.

La température moyenne minimale est enregistrée au mois du Janvier avec 1.6°C, et la température moyenne maximale est observée au mois de Juillet avec une valeur de 37.7°C, la moyenne annuelle est de l'ordre de 17.6°C.

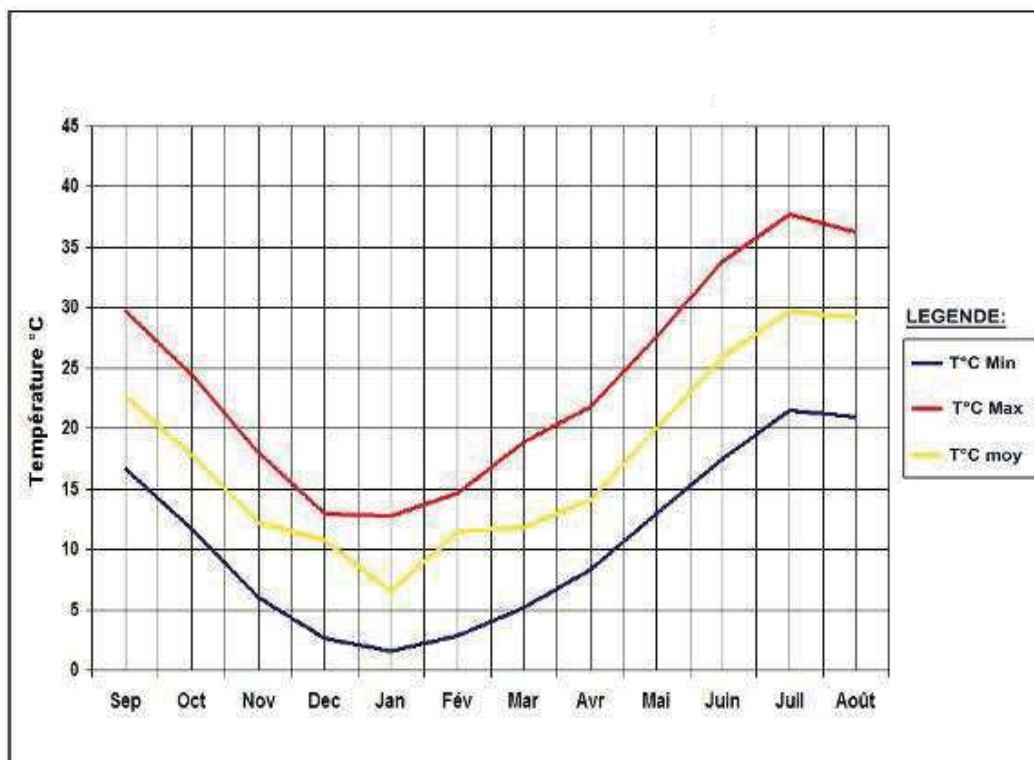


Fig.II.8 : Répartition mensuelle de la température d'Ain Oussera (1991-2011)

II.1.3. L'humidité

L'humidité relative présente la proportion d'eau dans l'air. Pour la région d'Ain Oussera, le mois de Décembre est le plus humide avec une valeur de 81.3% et le mois de Juillet est le plus sec avec une humidité relative de 34.3%.

Tableau.II.9 : Variation de l'humidité moyenne mensuelle (Station d'Ain Oussera 1995-2004)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Moyen annuel
Humidité (%)	52.8	63.9	73.2	81.3	77.6	73.7	64.3	59	52	41	34.3	36.6	59.14

II.1.4. Le Vent

Le vent se caractérise par sa vitesse, sa fréquence et sa direction. Les valeurs moyennes mensuelles de la vitesse du vent de la région d'Ain Oussera sont motionnées dans le tableau.II.9.

La vitesse moyenne annuelle enregistrée est de 3.32 m/s, alors que La vitesse maximale a été observée au mois de Décembre avec une valeur de 4 m/s et la vitesse minimale est enregistrée au mois de Juillet.

Durant la saison hivernale, les vents dominants provenant de secteur Ouest amène l'humidité du Nord. Par ailleurs, les vents dominant provenant du secteur Sud-Est peuvent êtres chauds et secs pendant la saison estivale.

Tableau.II.10: La vitesse moyenne mensuelle (Station d'Ain Oussera 1995-2004)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Moyen annuel
Vitesse moyenne du vent	3.4	3.5	3.6	4	3.7	3.4	3	3	3	2.8	3.5	3	3.32

II.2. Régime climatique

La combinaison des données des précipitations et celle des températures permet de mettre en évidence :

- ✓ Les périodes sèches et humides au cours de l'année grâce au diagramme pluviothermique de Gaussen.
- ✓ Le domaine climatique ou le type de climat suivant la méthode d'Emberger et/ou le calcul de l'indice d'aridité.

II.2.1. Digramme pluviothermique (Gaussen et Baygnons)

En se basant sur les données des précipitations et des températures mensuelles sur la même période d'observation, on peut établir la courbe pluviothermique dans le but de déterminer la période sèche et celle humide.

Un mois sec est celui où le total moyen des précipitations (mm) est inférieur ou égale au double de la température moyenne (°C) du même mois. Cette relation permet d'établir un diagramme pluviothermique sur lequel les températures sont portées à une échelle double des précipitations (in Baygnons).

Lorsque les températures passent au dessus de la courbe des précipitations, la période correspondante est déficitaire en eau ; et lorsque la courbe des précipitations passe au dessus de celle des températures, la période correspondante est humide.

Le diagramme pluviothermique montre que de la région d'Ain Oussera se caractérise par une période sèche qui s'étend sur 11 mois de l'année, et une période humide pendant le mois de Janvier (Fig.II.9).

Tableau.II.11: Valeurs moyennes mensuelles des précipitations (mm) et températures (°c) à la station d'Ain Oussera (1991-2011).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
P (mm)	21.54	25.7	22.0	20.2	22	17.16	21.6	24.1	27.8	15.5	5.14	8.4
T (°C)	22.7	17.8	12.2	10.7	6.5	11.5	11.8	14.1	20	25.9	29.7	29.2

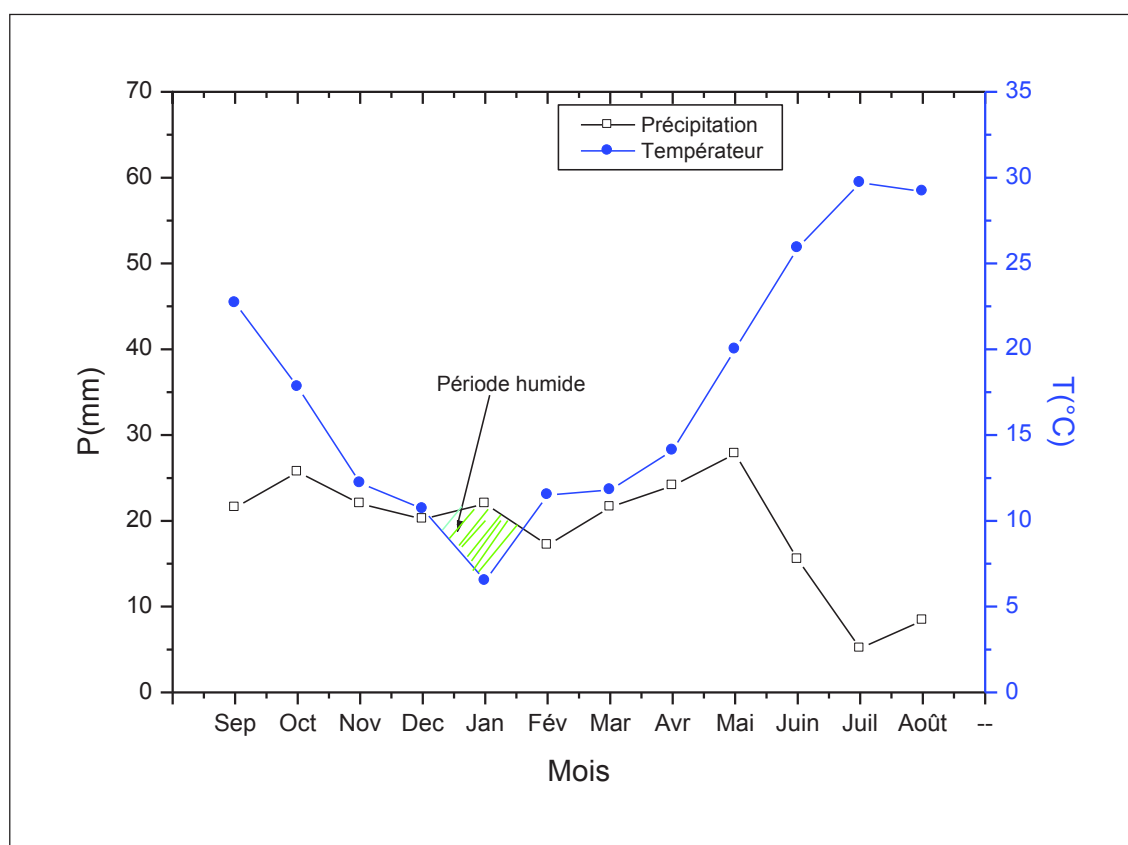


Fig.II.9: Diagramme pluviothermique de la station d'Ain Oussera (1991-2011)

II.2.2. Indice d'aridité mensuelle de De Martone(1923)

De Martone à établie un indice d'aridité qui se base sur deux paramètres climatiques à savoir : la température et la précipitation.

L'Indice d'aridité mensuel est donné par la formule suivante :

$$I_M = 12P/T+10$$

Avec :

I : Indice d'aridité.

P : : précipitation mensuelle en mm.

T: Température mensuelle en C°

La classification du climat est le suivant :

20 < IM > 30 : Climat tempéré.

10 < IM > 20 : Climat semi-aride.

7.5 < IM > 10 : Climat steppique.

05 < IM > 7.5 : Climat désertique.

IM < 05 : climat hyperaride

Les valeurs calculées pour la station d'Ain Oussera sont reportés dans le tableau.II.10.

Tableau.II.12: Indice d'aridité mensuelle.

Station/Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Dec
Ain Oussera	16.58	9.66	12.5	11.15	11.44	5.58	1.39	2.66	7.49	11.01	11.89	11.48

Les résultats obtenus montrent que la région d'Ain Oussera se caractérise par un climat désertique entre le mois de Juin et Septembre, par contre il est semi-aride pendant les restes des mois de l'année.

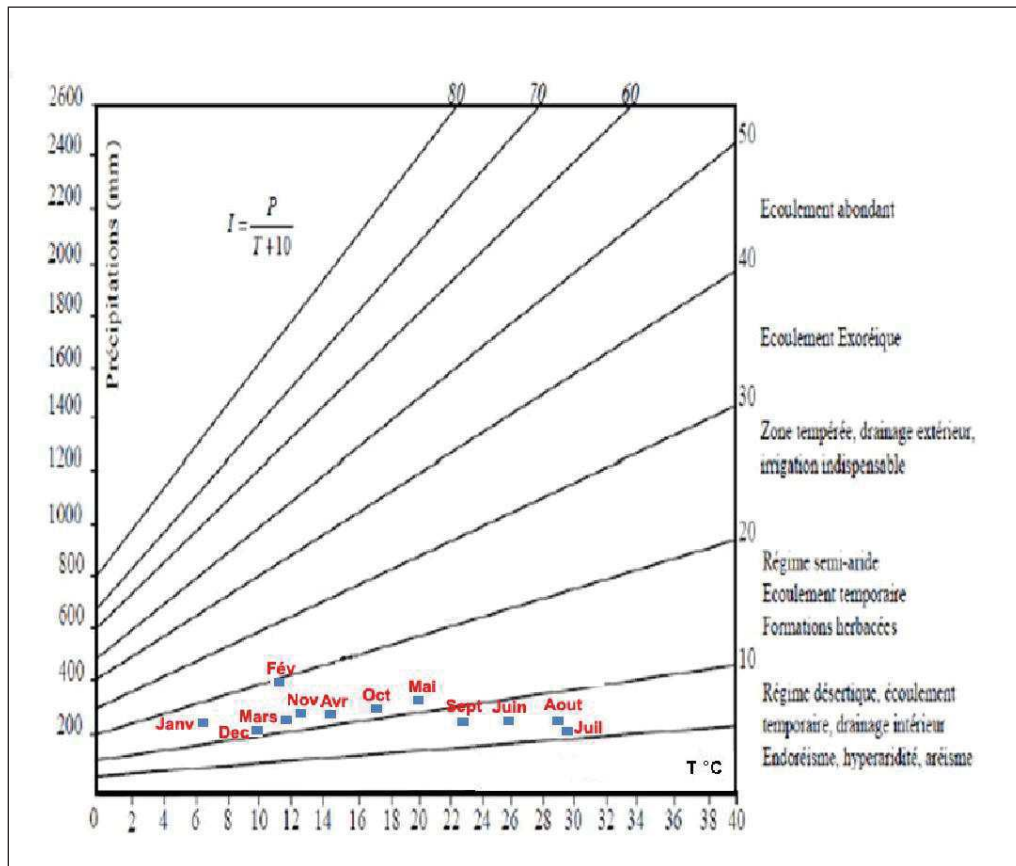


Fig.II.10: Abaque de l'Indice d'aridité Mensuel de DE Martone 1923

II.3. Calcul des paramètres du bilan hydrique

II.3.1. Evapotranspiration ou déficit d'écoulement

La connaissance du bilan hydrique d'une région consiste à évaluer la répartition des précipitations entre l'écoulement, l'infiltration et l'évaporation.

L'évapotranspiration est définie comme étant une restitution de l'eau sous forme de vapeur de la surface terrestre à l'atmosphère. Cette notion englobe aussi bien la lame d'eau évaporée à partir du sol que celle transpirée par les plantes. Elle est donc un élément très important pour l'établissement du bilan hydrique et dépend de plusieurs paramètres : la température, les précipitations, l'humidité de l'air, le couvert végétal.

II.3.1.1. Calcul de l'Evapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est la quantité d'eau pouvant être restituée à l'atmosphère par transpiration des êtres vivants et évaporation du sol et des surfaces d'eaux libres, si celui-ci contient en permanence la quantité d'eau suffisante, alors que l'évapotranspiration réelle (ETR) correspond à la quantité d'eau effectivement transpirée et évaporée.

On utilise la méthode de C.W Thornthwaite pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et cette dernière avec la formule de Turc pour estimer l'évapotranspiration réelle (ETR).

➤ **Calcul de L'évapotranspiration potentielle selon la formule de Thornthwaite (1948)**

Elle est exprimée par la relation :

$$ETP = 1.6 (10 T / I)^a \quad ETP_c = ETP \times K$$

Avec $I = \sum i / (i = T / 5)^{1.514} \quad a = 1.6 (I/100) + 0.5$

ETP= évapotranspiration mensuelle en mm ;

T : température moyenne mensuelle en °C ;

I : Indice thermique annuel soit la somme des indices de chaleur mensuelle ;

K : coefficient d'ajustement mensuel représente le facteur de correction, il est fonction du mois et de la latitude

Les résultats sont portés sur les tableaux suivants :

Tableau.II.13: Evaluation de l'ETP moyenne mensuelle et annuelle par la formule de Thornthwaite à la station d'Ain Oussera (1914-2011)

Mois	T (°C)	<i>i</i>	ETP (mm)	K	ETP _c (mm)	ETP Atlas_ANRH 2002
Septembre	22.7	9.88	98.40	1.03	101.35	160
Octobre	17.8	6.83	62.19	0.97	60.32	95
Novembre	12.2	3.85	30.48	0.86	26.21	50
Décembre	10.7	3.16	23.80	0.84	19.99	35
Janvier	6.5	1.48	9.29	0.87	8.08	38
Février	11.5	3.52	27.27	1.85	50.45	52
Mars	11.8	3.66	28.62	1.03	29.48	92
Avril	14.1	4.80	40.06	1.1	44.07	135
Mai	20	8.15	77.48	1.21	93.75	180
Juin	25.9	12.06	126.20	1.22	153.96	220
Juillet	29.7	14.84	163.41	1.24	202.63	250
Août	29.2	14.46	158.29	1.16	183.62	230
Σ		86.69	845.49		973.92	1537

Tableau.II.14: Evaluation de l'ETP moyenne mensuelle et annuelle par la formule de Thornthwaite à la station Ksar Challala (1985-2007)

Mois	T (°C)	<i>i</i>	ETP (mm)	K	ETP _c (mm)	ETP Atlas_ANRH 2002
Septembre	23.3	10.27	110.09	1.03	113.39	160
Octobre	16.6	6.15	61.99	0.97	60.13	95
Novembre	11.1	3.34	31.35	0.86	26.96	50
Décembre	7.4	1.81	15.77	0.84	13.25	35
Janvier	6.8	1.59	12.66	0.87	11.01	38
Février	8.3	2.15	19.16	1.85	35.45	52
Mars	10.9	3.25	30.40	1.03	31.31	92
Avril	14	4.75	46.45	1.1	51.1	135
Mai	18.4	7.18	73.80	1.21	89.3	180
Juin	23	10.07	107.7	1.22	131.39	220
Juillet	27.1	10.92	142.2	1.24	176.33	250
Août	27.4	13.13	144.88	1.16	168.06	230
Σ		74.61			907.68	1537

Les données du tableau II.11 et II.12, montrent que l'ETP mensuelle moyenne minimale est enregistrée au mois de janvier avec 8.08 mm, par contre la valeur maximale est enregistrée au mois de Juillet avec 202.63 mm.

L'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle de la région d'Ain Oussera est de 973.92 mm pour un indice thermique annuel $I = 86.69$, alors, les valeurs de l'ETP sont largement supérieures aux précipitations qui sont de 226,15 mm. L'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle calculée par l'ANRH est 1537 (annexe Atlas d'évapotranspiration du Nord de l'Algérie.2002).

II.3.1.2. Calcul de l'Evapotranspiration réelle (ETR)

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

➤ Méthode de Turc (1954)

Cette formule est applicable à tous les climats, elle est fonction de la précipitation et de la température moyenne annuelle et s'écrit sous la forme :

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

$$\text{Avec } A = 0.9 + P^2 / L^2$$

$$L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$$

Ou' :

ETR : Evapotranspiration réelle en (mm).

P : Précipitation moyenne annuelle en (mm/an).

T : Température moyenne annuelle en (°C).

L : Pouvoir évaporant de l'atmosphère.

N.B : En l'absence des données de la température des stations de Had Sahary, Birine, Guelt Esstel, Chahbonia et Zmelt El Ami AEK, on va prendre dans les calculs la température de la station d'Ain Oussera. Pour la station de Ksar Challala la température moyenne annuelle est de 16.20°C.

Les résultats des calculs pour les différentes stations sont motionnées au tableau.II.13.

Tableau.II.15 : Résultats des calculs de l'ETR selon la méthode de TURC

Station	P moyen (mm)	T (°C)	L	ETR (mm)
Ain Oussera	231.14	17.6	912.58	235.4
Birine	221	17.6	912.58	225.71
Had Sahary	227.9	17.6	912.88	232.31
Ksar Challala	214.9	16.2	817.57	218.3
Zmelt El Ami AEK	106.5	17.6	912.88	111.42
Guelt Esstel	297.6	17.6	912.88	296.66
Chahbounia	147.1	17.6	912.88	152.86
ETR moyen				210.38

➤ **Méthode de Coutagne**

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

Avec : $\lambda = 1 / (0.8 + 0.14T)$

D : Déficit d'écoulement (m).

P : Précipitation moyenne (m).

T: Température moyenne annuelle (°C).

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

II.3.2. Bilan hydrique par la méthode de G.W.THORNTHWAITE

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

Thornthwaite propose une méthode qui se base sur la précipitation moyenne mensuelle, le calcul de l'ETP mensuelle et de la RFU.

II.3.2.1. Estimation de la réserve facilement utilisable (RFU)

Elle présente la quantité d'eau emmagasinée dans la couche pédologique (RFU) qui est facilement utilisable par les plantes et nécessaire pour leur bon fonctionnement physiologique. Son degré de saturation dépend de plusieurs facteurs :

- La nature, la composition lithologique et l'épaisseur de la couche superficielle.
- La profondeur du niveau piézométrique de la nappe aquifère.
- Le climat de la région.
- Le type de la couverture végétale.

On peut calculer la RFU d'après la formule de Hallaire (1954)

$$RFU = (C-F/100) *h*D+30$$

Avec :

C : Capacité de rétention aux champs.

D : Densité apparente du sol.

F: Capacité au point de flétrissement en (%) (La limite inférieure de l'eau absorbable par les plantes).

h : Profondeur du sol en (mm).

Hallaire propose :

C - F =05% pour un sol sablo limoneux.

C - F =10% pour un sol limoneux.

C - F =20% pour un sol argilo-limoneux.

Pour notre étude on prendre :

C – F : 05% (le remplissage du quaternaire est constitué par des sables argileux).

D =1 et la profondeur du sol (h) =25cm.

Application numérique de l'expression nous donne un RFU = 30mm.

II.3.2.2. Etablissement du bilan

Pour le calcul de l'évapotranspiration réelle, on utilise la méthode de C.W.Thornthwaite, où on distingue deux cas principaux :

1. Pour un mois $P - ETP > 0$; c.-à-d. : $P > ETP$, dans ce cas $ETR = ETP$, la quantité d'eau qui reste ($P - ETR$) va alimenter la RFU jusqu'à son maximum (30mm) et si elle dépasse cette valeur, il y' aura un excédent (EX) qui va partir sous forme d'infiltration efficace vers la nappe.

2. Pour un mois $P - ETP < 0$; c.-à-d. : $P < ETP$, ce cas est subdivisé encore en deux cas :

1. a- Si $P + RFU > ETP \Rightarrow ETR = ETP$.

2. b- Si $P + RFU < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$.

❖ Si $RFU = 0$, la quantité ($Da = ETP - ETR$) représente de déficit agricole, c'est-à-dire sensiblement la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux plantes pour qu'elles ne souffrent pas de la sécheresse. (ANRH, Notice).

Les résultats du calcul du bilan pour la station d'Ain Oussera et Ksar Challala sont portés aux tableaux ci-dessous (tableau. II.14 et tableau. II.15).

Tableau.II.16 : Bilan hydrique selon Thornthwaite à la station d'Ain Oussera (1914-2011).

Mois	P moyen (mm)	ETPc (mm)	P-ETP	ETR (mm)	RFU (mm)	Excédent (mm)	Déficit (mm)
Septembre	21.54	101.35	-79.81	21.54	0	0	79.81
Octobre	25.7	60.32	-34.62	25.7	0	0	34.62
Novembre	22	26.21	-4.21	22	0	0	4.21
Décembre	20.2	19.99	0.21	19.99	0.21	0	0
Janvier	22	8.08	13.92	8.08	6.05	0	0
Février	17.16	50.45	-33.92	23.21	0	0	27.24
Mars	21.6	29.48	-7.88	21.6	0	0	7.88
Avril	24.1	44.07	-19.97	24.1	0	0	19.97
Mai	27.8	93.75	-65.95	27.8	0	0	65.95
Juin	15.5	153.96	-138.46	15.5	0	0	138.46
Juillet	5.14	202.63	-197.49	5.14	0	0	197.49
Août	8.4	183.62	-175.22	8.4	0	0	175.22
	231.14	973.92		223.06			

Tableau.II.17 : Bilan hydrique selon Thornthwaite à la station de Ksar Challala (1985-2007).

Mois	P moyen (mm)	ETPc (mm)	P-ETP	ETR (mm)	RFU (mm)	Excédent (mm)	Déficit (mm)
Septembre	23.4	113.39	-89.99	23.4	0	0	89.99
Octobre	23	60.13	-37.13	23	0	0	37.13
Novembre	19.9	26.96	-7.06	19.9	0	0	7.06
Décembre	21	13.25	7.75	13.25	7.75	0	0
Janvier	19.3	11.01	8.29	11.01	15.77	0	0
Février	16.5	35.45	-18.95	32.27	0	0	3.18
Mars	17.7	31.31	-13.61	17.7	0	0	13.61
Avril	17.5	51.1	-33.6	17.5	0	0	33.6
Mai	26.9	89.3	-62.4	26.9	0	0	62.4
Juin	10.2	131.39	-121.19	10.2	0	0	121.19
Juillet	9.8	176.33	-166.53	9.8	0	0	166.53
Août	9.9	168.06	-158.16	9.9	0	0	158.16
		907.68		217.82			

Au terme de ce bilan hydrique pour les stations d'Ain Oussera et Ksar Challala selon Thornthwaite, nous pouvons dire :

- Au cours de l'année, la pluviométrie dépasse deux fois l'évapotranspiration potentielle, pour les mois de Décembre et Janvier. Cette diminution est causée par les faibles températures observées dans cette période (période froide).
- l'ETP atteint le maximum au mois de Juillet (202.63mm) et son minimum au mois de Janvier (8.08 mm) à la station d'Ain Oussera.
- La constitution de la RFU ne s'effectue qu'au mois de Janvier avec une valeur de 6.05 mm et au mois de Décembre avec une valeur de 0.21 mm. Le reste de l'année est épuisé à la station d'Ain Oussera.
- La sécheresse constitue une partie prédominante de l'année hydrologique. Elle dure 10 mois de l'année (sauf Janvier et Décembre). Cette période est donc marquée par un déficit agricole de 750.85 mm au total annuel à la station d'Ain Oussera.

II.3.3. Estimation du ruissellement

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

- lorsque les précipitations augmentent, le ruissellement tend à égaler les précipitations déduction faite de l'évapotranspiration plafonnée à la valeur de l'évapotranspiration potentielle

- lorsque les précipitations tendent aussi vers zéro, le ruissellement tend aussi vers zéro, et le rapport de ruissellement à la pluviométrie tend vers zéro.
- Le défaut de la méthode est qu'elle ne tient pas compte de la nature des sols ou des formations traversées.

La formule est :

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

Avec :

P : Précipitation moyenne annuelle (mm).

R : Ruissellement moyenne annuel (mm).

ETP : Evapotranspiration potentielle annuelle (mm).

L'application numérique de la formule pour les deux stations.

Tableau. II.18 : Résultats du calcul du ruissellement

Station	P (mm)	ETP (mm)	R (mm)	R%
Ain Oussera	231.14	973.92	4.34	1.87
Ksar Challala	214.9	907.68	4.01	1.86

Ces valeurs calculées restent discutables puisque la formule de Tixeront-Berkaloff ne tient pas en compte de la nature lithologique des terrains traversés et la couverture végétale.

II.3.4. Estimation de l'Infiltration

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

$$P = E + R + I$$

Avec :

P : Précipitation moyenne annuelle (mm).

R : Ruissellement (mm).

I : Infiltration (mm).

E : Evapotranspiration réelle annuelle (mm).

L'infiltration : $I = P - (R + ETR)$ est égale à 11.43 mm/an, soit 5.05% des précipitations moyennes annuelles tombées sur l'ensemble du bassin versant, mais il faut noter que seules les mesures d'infiltration in situ réparties sur les différents faciès du bassin, permettraient une meilleure approche de ce paramètre.

II.4. Conclusion

La plaine d'Ain Oussera est caractérisée par un climat semi-aride, avec un été chaud et sec et un hiver froid. La précipitation moyenne est de 226.15 mm/an et la température moyenne annuelle est de 17.6°C.

L'Humidité relative moyenne annuelle est de 59.14% avec des valeurs moyennes mensuelles oscillant entre 34.3% dans l'été au mois de Juillet et 81.3% en Hivers au mois de Décembre.

L'évapotranspiration est de l'ordre de 940.8 mm/an, elle représente 400% des précipitations annuelles (selon la méthode de Thorntwaite).

Le bilan hydraulique de la région est déficitaire presque toute l'année avec un déficit agricole de 692.85 mm dans la station de ksar Challala et de 750.85 mm dans la station d'Ain Oussera.

La lame ruisselée est de 4.34 mm/an et l'infiltration est de l'ordre de 11.43 mm/an soit 5.05% de la précipitation annuelle.

Ces résultats montrent que la pluviométrie efficace représente la lame d'eau infiltrée, directement en apportant, ainsi, une recharge à la nappe.

CHAPITRE III

HYDROGEOLOGIE ET HYDRODYNAMIQUE DU SYSTEME AQUIFERE DE LA PLAINE D'AIN

OUSSERA

III. Introduction

On définit l'aquifère comme une couche ou massif de roches perméables suffisamment saturée et conductrice d'eau souterraine pour permettre l'écoulement significatif de ces eaux vers les ouvrages de captages avec de quantités appréciables (Castany, 1979).

L'étude hydrogéologique a pour finalité la planification de l'exploitation des ressources en eaux souterraines, ceci après avoir une idée sur le comportement des différents aquifères existants dans la plaine d'Ain Oussera et l'évaluation ces potentialités hydriques et l'évolution de la surface piézométrique, ainsi sur le comportement hydrodynamique et les conditions aux limites des ces ressources.

Le dimensionnement de la couche mouillée et l'estimation de volume de réservoir nécessitent la mise en évidence :

- Des niveaux piézométriques grâce à la carte piézométrique.
- De la carte de substratum de l'aquifère.
- Des paramètres hydrodynamiques de la nappe (perméabilité, transmissivité, coefficient d'emménagement, porosité).

III.1 Identification des différents niveaux aquifères

La description lithostratigraphique et les études géophysiques précédentes ont fait apparaître que la région d'étude renferme de nombreux aquifères potentiels. Ces formations perméables affleurent largement sur les reliefs de bordure, contribuant par leur impluvium à la recharge des aquifères. Les principales formations aquifères existantes dans la région d'Ain Oussera sont présentées au Figure.III.1

III.1.1. Remplissage du Quaternaire

L'Horizon aquifère du Plio-Quaternaire dont les dépôts sont essentiellement formés par des conglomérats et poudingues bien perméables, sont très étendus dans la plaine. Plusieurs puits dont la profondeur varie de (03 m à 50 m) sollicitent cette formation. Son alimentation se fait essentiellement par la pluviométrie.

III.1.2. Miocène

Les grès et argiles sableuse constituent une nappe aquifère, ces potentialités hydriques sont mal connues. La nappe est sollicitée par des puits traditionnels et des forages peu profonds.

III.1.3. Eocène inférieur et moyen

L'aquifère sise dans calcaires à silex qui affleurent dans la zone Nord-Est de la plaine et en particulier à proximité de la ville de Birine.

III.1.4. Turonien

L'aquifère du Turonien est capté par quelques puits très locaux, profond de (14,5 m à 43 m), qui ont mis à découvert les calcaires. Ces dépôts plongent en profondeur au fur et à mesure que l'on s'éloigne vers le Nord et le Nord-Est. A ce niveau, l'aquifère n'a été atteint que par le forage d'El Khrachem à 570 m, le débit donné a été très faible.

III.1.5. Cénomaniens

Les dépôts du Cénomaniens, servent partout de mur à cet aquifère, dont le rendement très bas, la profondeur considérable du gisement et la forte minéralisation, font qu'il n'offre guère de prospection encourageante pour la région.

III.1.5. Albien

Dans la plaine d'Ain Oussera, l'Albien est constitué par des grès continentaux perméables. Il constitue l'aquifère le plus important et le plus intéressant de la région. En effet, cette formation affleure en plusieurs points sur la plaine, tandis qu'ailleurs, le toit de l'aquifère est proche de la surface du sol. En outre, à l'inverse de la formation Aptienne, l'Albien se montre peu cloisonné par les argiles. Plusieurs forages, d'une profondeur de 100 m à 300 m captent ces grès. Les débits varient de 20 l/s à 75 l/s et les débits spécifiques sont de l'ordre de 1 à 7 l/s/m.

III.1.6. Barrémien

La formation barrémiennes présente des caractéristiques hydrogéologiques aussi intéressantes que celles de l'Albien, et constitue de ce fait, un réservoir important. La lithologie du Barrémien est comparable à celle de l'Albien, il est formé essentiellement par des grès blancs friables à ciment calcaire altérant avec des marnes grises et argile gréseuse et dolomie à la base. Son épaisseur totale est de 350 m. Cet horizon aquifère présente des potentialités importantes, mais il reste peu exploité de fait la mauvaise qualité chimique des ces eaux.

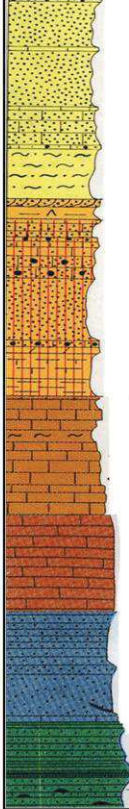
Symbole	Système	Etage	Faciès Lithologique	Catctéristiques de l'aquifère	Epaisseur (m)
	Quaternaire		Alluvion récente et sable argileux	nappe superfécielle à porosité d'interstice Exploitée par de puits et des forages peu profonds	10 à 30
	Tertiaire	Miocène	Grès et argiles sableuses	Aquifère perméable limité, exploité par des puits au niveau du Birine	170
		Eocène	Calcaire à silex	Aquifère fissurée à potentialité faible Exploité par des puits	
	Crétacé	Turonien	Calcaire dolomitique	Aquifère fissurée à Potentialité limité non exploitée	150
	Supérieur	Cénomanién	Calcaire dolomitique marneux calcaire	Aquifère à perméabilité Des fissures, non exploitée	200 à 280
	Crétacé	Albien Inf	Grès beige fraible à ciment calcaire sable et argile	Aquifère à potentialité hydraulique importante exploité par des forages	150 à 200
	Inférieur	Barrémien	Grès grossier à ciment Calcaire et passées d'argiles	Aquifère perméable Non exploité, mauvaise qualité d'eau	350

Fig.III.1 : Caractéristiques hydrogéologiques des différentes formations (ANRH, 1983)

III.2. Aquifère de l'Albien inférieur

Les raisons qui expliquent l'importance régionale de la nappe albiennne sont les suivantes :

- Les caractéristiques lithologiques favorables et la puissance des formations albiennes.
- La qualité de l'eau supérieure à celle de l'eau contenue dans les terrains sous-jacents (Barrémien et Aptien).
- La proximité de la nappe ; l'Albien est proche de la surface sur la majeure partie de la plaine.
- La faible proportion de niveaux argileux en comparaison avec les formations sous-jacentes.

Les nombreux niveaux argileux de l'Aptien et du Barrémien limitent considérablement la circulation verticale de l'eau. L'Albien, en revanche, est nettement moins cloisonné par les argiles (voir annexe).

La nappe Albienne constitue donc l'aquifère le plus intéressant de la région. Il est capté par de nombreux forages destinés à l'alimentation en eau potable des villes et aux exploitations agricoles.

L'épaisseur de l'aquifère Albienne n'est pas uniforme à travers toute l'étendue de la plaine d'Ain Oussera. Les résultats des campagnes géophysiques ainsi que ceux des forages et piézomètres réalisés confirment que l'épaisseur de la formation albienne est plus importante dans la zone Est que dans la zone Ouest. D'après les études précédentes, les argiles et marnes de l'Apvien constituent un écran imperméable limitant la libre circulation de l'eau entre l'Albien et le Barrémien (ANRH, 1983).

L'Albien est affecté par de nombreuses failles qui facilitent la circulation des eaux. Les terrains albiens constituent donc un milieu de circulation hétérogène, caractérisé par une double perméabilité, d'interstices et de fractures. La coupe hydrogéologique dressée à partir des logs des forages décrit bien cette variation du faciès (Figure III.2).

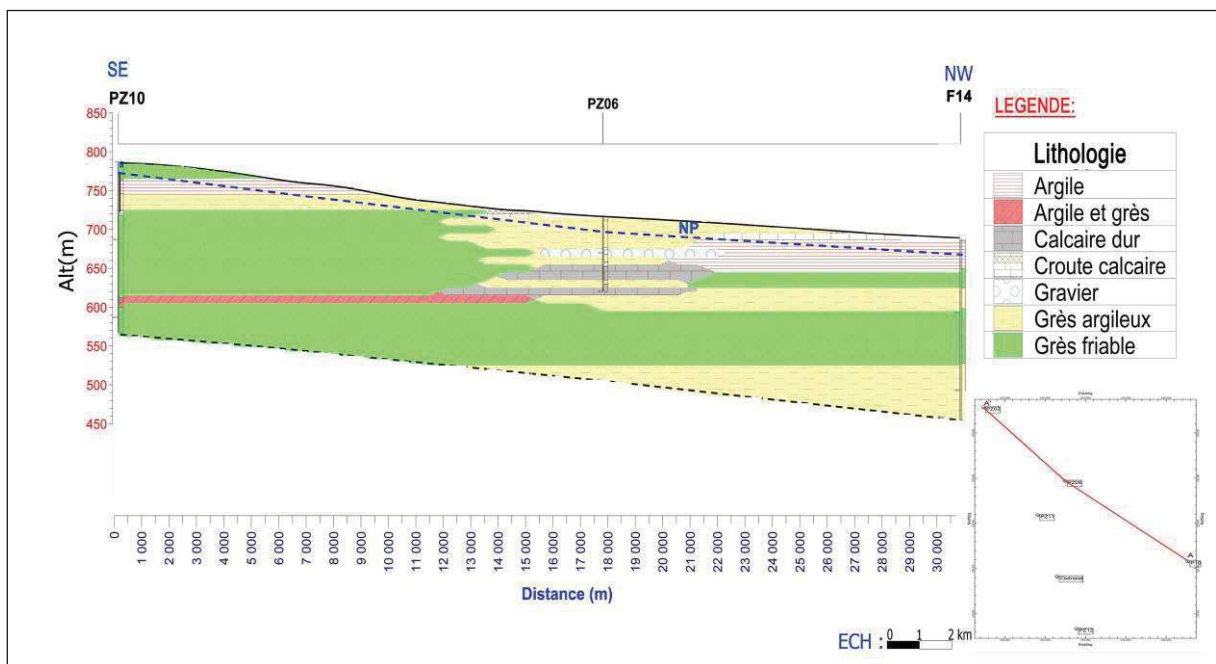


Fig.III.2 : coupe hydrogéologique à travers la plaine d'Ain Oussera

III.3. Structure et Géométrie du l'aquifère

III.3.1. Structure du l'aquifère

En vue de mieux comprendre la structure et l'extension du système aquifère de la plaine d'Ain Oussera, on a dressé trois coupes hydrogéologiques à partir des logs lithostratigraphiques des forages. Les trajectoires des coupes est sur la carte géologique (Figure.III.3)

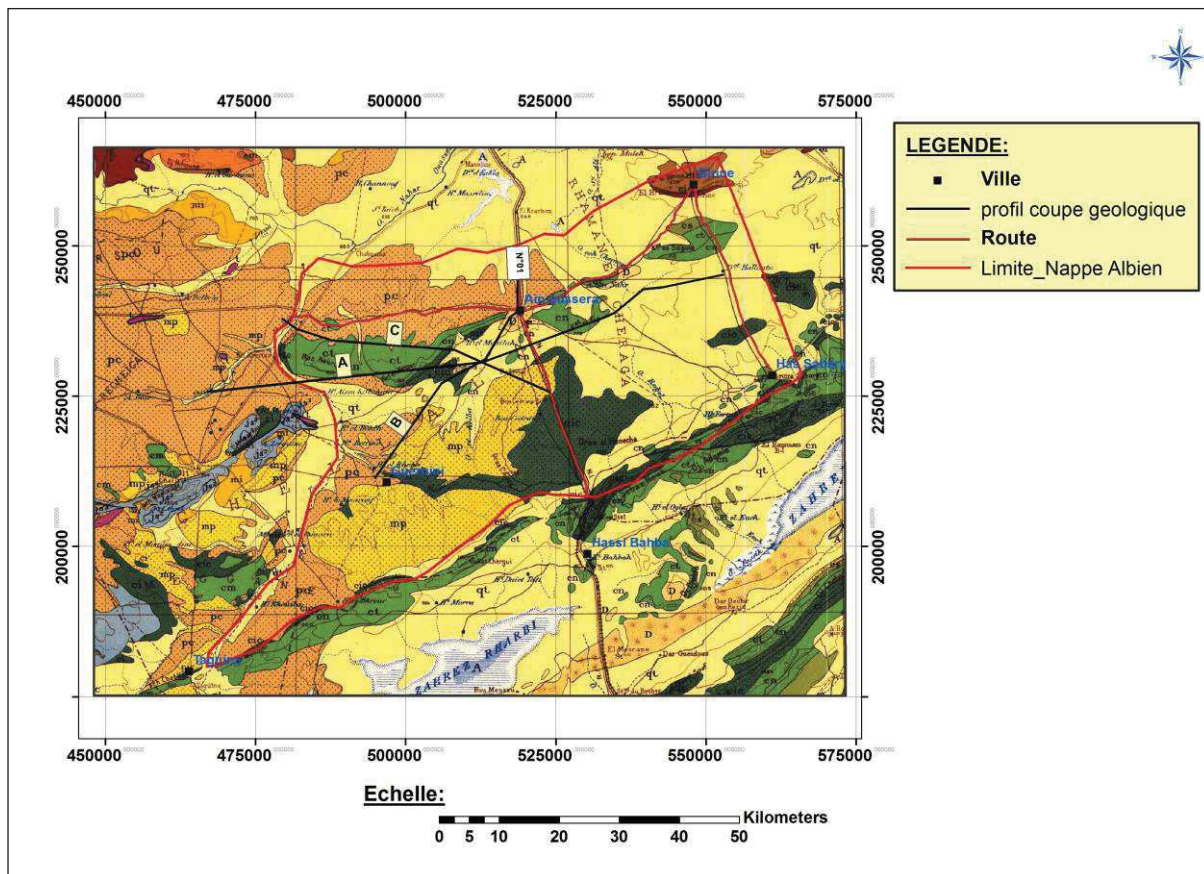


Fig.III.3 : Positionnement des forages composant les corrélations Lithostratigraphiques

III.3.1.1. Coupe hydrogéologique A

La coupe traverse l'ensemble la plaine d'Ain Oussera de l'Ouest vers l'Est sur un axe de 90 km. La formation gréseuse de l'albien apparaît comme un anticlinal dont ces flancs sont enfouillés sous les formations du cénomaniens (marnes et argiles) et le remplissage du miopliocène (sable argileux et gravier). Ces formations reposent sur un écran imperméable de l'Aptien. Les épaisseurs de l'Albien sont irrégulières, elles sont importantes dans la zone Ouest et partiellement érodées au centre (Figure.III.4).

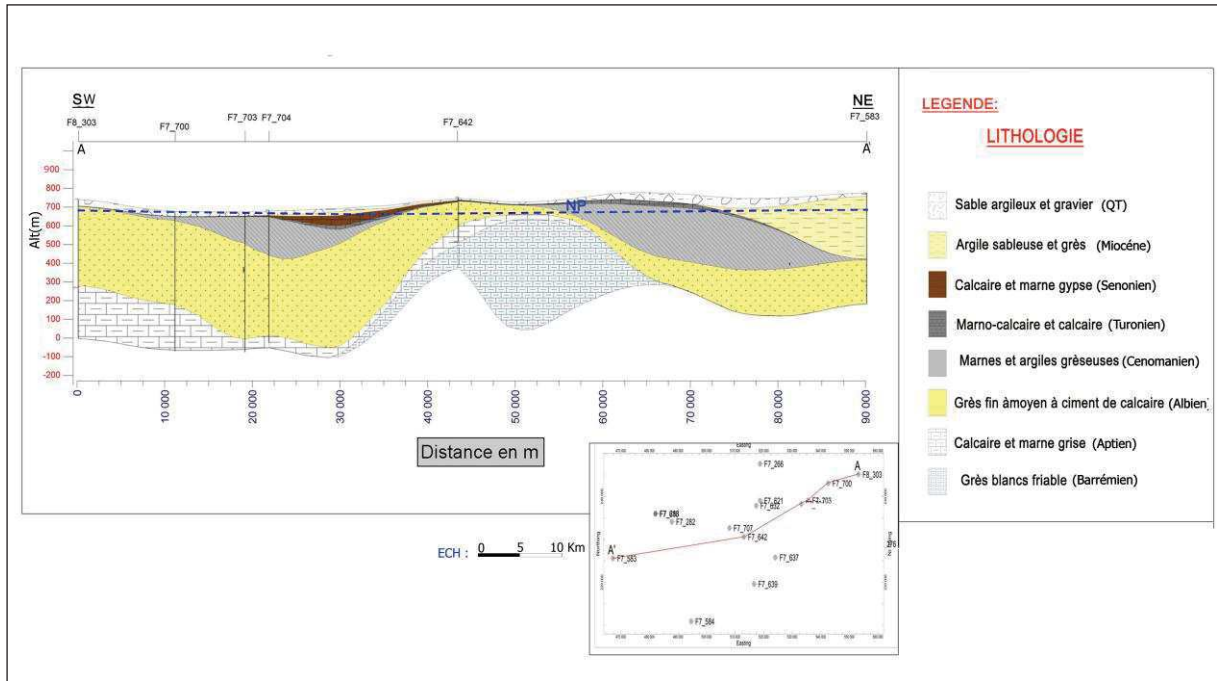


Fig.III.4 : Coupe hydrogéologique A

III.3.1.2. Coupe hydrogéologique B

Cette coupe montre la structure de la limite nord du système de l'albien, et traduit le plongement accentué de l'Albien au nord de la ville d'Ain Oussera, dont son épaisseur est régulière sous les recouvrements du crétacé supérieur. Au bout sud de la coupe le toit l'Albien est près de la surface, il est partiellement érodé (Figure.III.5). Cette coupe confirme les résultats apportés par l'étude géophysique (Fig. I.13).

III.3.1.3. Coupe hydrogéologique C

Cette coupe illustre la structure hydrogéologique de la zone Nord-Ouest de la plaine d'Ain oussera. La partie Nord –Ouest de la coupe montre l'ennoyage à grande profondeur de la formation de l'Albien sous une épaisse formation du cenomanien, alors au Sud-Est on remarque la remontée des formations sous-jacentes du crétacé inférieur.

Le toit l'albien affleure en surface dans partie Sud-Est et son épaisseur devient moins importante. Le substratum de l'aquifère de l'Albien est constitué par les calcaires et marne de l'Aptien (Figure.III.6).

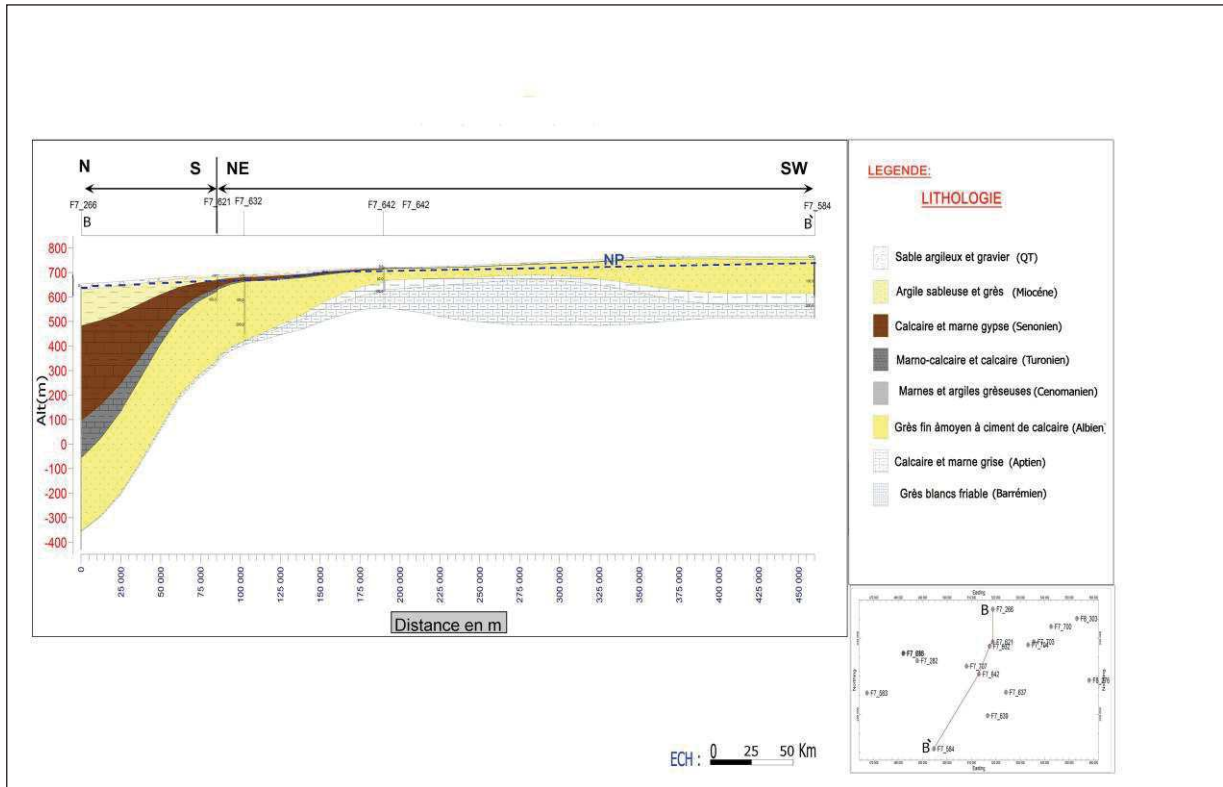


Fig.III.5 : Coupe hydrogéologique B

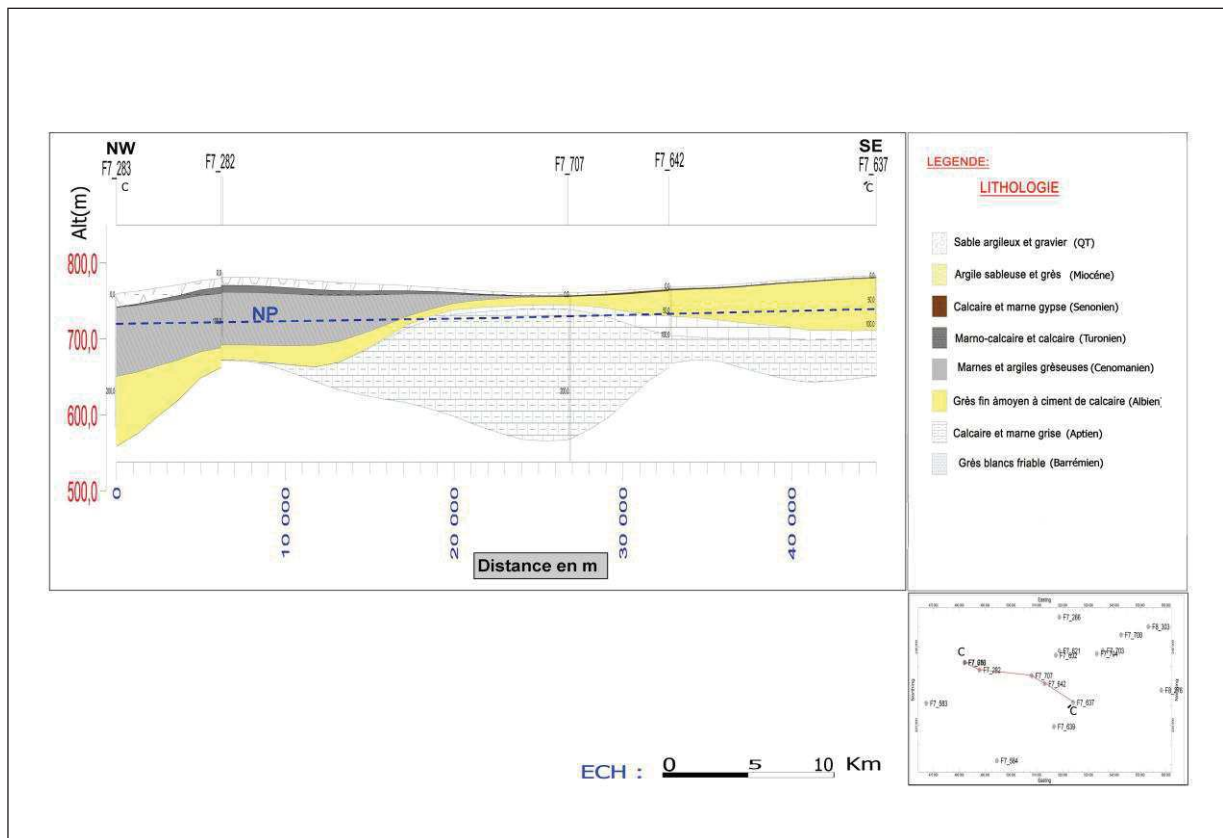


Fig.III.6 : Coupe hydrogéologique C

III.3.2. Epaisseur du réservoir de la nappe de l'Albien inférieur

La carte isopache a été établie à partir des coupes lithostratigraphiques des forages réalisés, ainsi que les coupes géoélectriques, elle nous a permis de visualiser la structure du réservoir de la nappe d'eau de l'Albien inférieur.

L'Examen des cette carte révèle la présence des faibles épaisseurs au centre de la plaine, cette zone correspond au cœur de l'anticlinal principal où son axe passe par djebel Touil à l'Est, et Bouceddraia, Koudiat sidi Aissa à l'Ouest, le toit de l'albien se trouve approximait du surface, il est partiellement érodé. Son épaisseur varie entre 83 et 100 m (Fig.III.7).

Les épaisseurs maximums enregistrées sont de 175 à 225 m, et caractérisent la zone Nord de la plaine, dans cette partie les formations de l'albien conservent sont épaisseur sous recouvrement du crétacé supérieur. Dans le reste de la plaine les épaisseurs de l'Albien oscillent entre 100 à 175m. L'épaisseur moyenne de la formation de l'Albien est de 150 m.

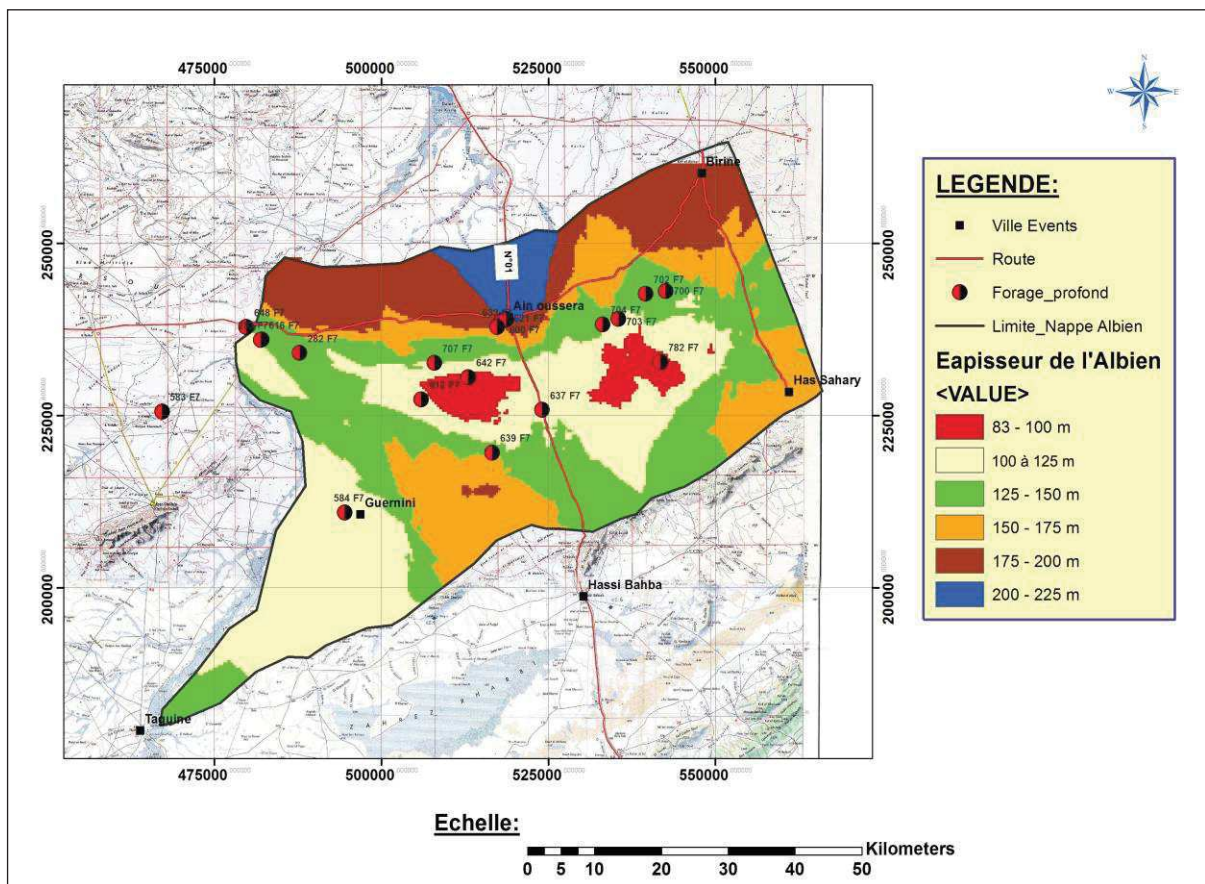


Fig.III.7 : Carte d'égalé épaisseur de l'Albien inférieur

III.4. Les paramètres hydrodynamiques de la nappe de l'Albien

Les principaux paramètres qui régissent les écoulements souterrains sont : le coefficient de perméabilité, le coefficient de transmissivité et le coefficient d'emmagasinement.

Les différentes définitions mentionnées ci-dessous sont extraites en grande partie du dictionnaire Français d'hydrogéologie (Castany & Margat, 1977).

- Le coefficient de perméabilité : exprime l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de potentiel. Il est exprimé par la lettre K et a la dimension d'une vitesse ($L.T^{-1}$).
- Le coefficient de la transmissivité : est un paramètre qui régit le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur de la zone saturée d'un aquifère continu (mesuré selon une direction orthogonale à celle de l'écoulement) et par unité de gradient hydraulique. C'est le produit du coefficient de perméabilité (de Darcy) K par la puissance de l'aquifère e , en milieu isotrope. Il est exprimé par la lettre T et sa dimension est ($L^2.T^{-1}$).
- Le coefficient d'emmagasinement: noté S , représente le rapport du volume d'eau libéré ou emmagasiné par unité de surface d'un aquifère, à la variation de charge hydraulique correspondante, dans un temps illimité. Dans un aquifère libre, il équivaut en pratique à la porosité efficace et sa signification n'est pas indépendante du temps. Cette grandeur est sans dimension.

III.4.1. La Transmissivité

La carte des transmissivités a été élaborée à partir des points d'eaux réparties sur toute la plaine d'Ain Oussera (Annexe III). La carte visualise les caractéristiques hydrodynamiques et lithologiques, la variation latérale de transmissivité est lié soit au changement d'épaisseur de la nappe d'eau soit au type de formations constituant l'aquifère.

Au total, 50 valeurs de transmissivité ont été recueillies. Les transmissivités ont été traduites en perméabilités équivalentes. L'épaisseur prise en compte pour ce calcul est celle comprise entre le toit de l'Albien et la base du forage.

- Des transmissivités sont disponibles pour 12 piézomètres du réseau de suivi implanté par l'ANRH (Ayad, 1984).
- 62 rapports de fin de forages ont été récupérés à la DRE de Djelfa. 34 d'entre eux présentent des résultats de pompages d'essai qui concernent exclusivement l'aquifère de l'Albien.
- Le rapport de fin des travaux des ouvrages d'alimentation en eau potable de la ville d'Ain Oussera F4, F5, F6, F7 et F8 (Ayad, 1984) présentent des résultats de pompages d'essai.

- Le rapport de la fin des travaux des forages F1, F2 et F3 à Birine.
- Le rapport de la fin des travaux des forages F4, F5 et F6 à Birine.

L'analyse de la carte nous montre l'existence de trois zones avec des valeurs de transmissivité différentes (Figure.III.8) :

- Zone Nord-Est : ce caractérise par des valeurs de transmissivités fortes, de l'ordre de $0.5 \cdot 10^{-2}$ et $1,25 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, ceci peu être expliqué par la l'importance épaisseur des l'aquifère, ce qui est confirmé par les études géophysiques.
- Zone Sud-Ouest : les valeurs de la transmissivité sont moyennes, et revient à la bonne perméabilité des formations de l'albien.
- Zone Sud-Est et Nord-Ouest : cette zone concerne la région de Had Sahary Bou Cedraia et Sidi Ladjel.les valeurs de la transmissivités sont très faibles, elles oscillent entre $0.05 \cdot 10^{-3}$ et $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, ce qui revient essentiellement à la prédominante des dépôts fins dans les formations l'aquifère.

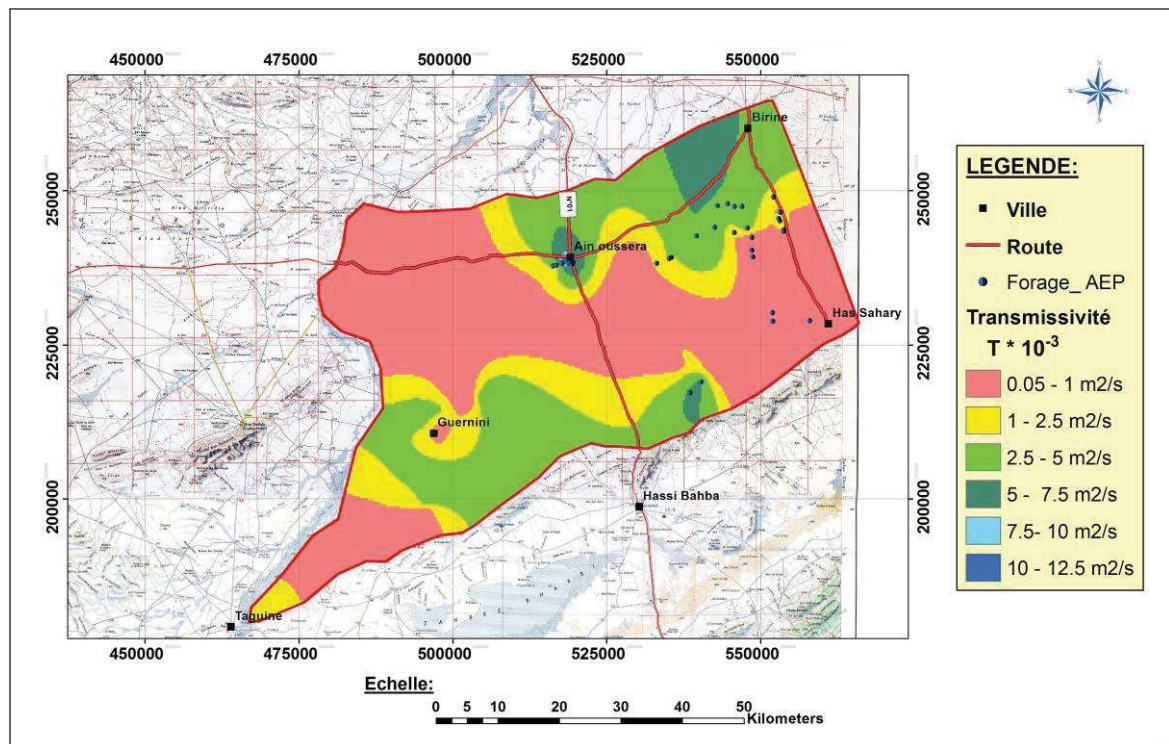


Fig.III.8 : Carte de la transmissivité de l'Albien inférieur

III.4.2. La Perméabilité

La carte des coefficients de perméabilité montre que la répartition des valeurs de perméabilité est similaire à celle de la transmissivité. Les fortes valeurs de la perméabilité se localisent dans la zone Nord-Est (Birine –Ain Oussera) et au Sud-Ouest de la plaine, les valeurs varient entre $2 \cdot 10^{-5}$

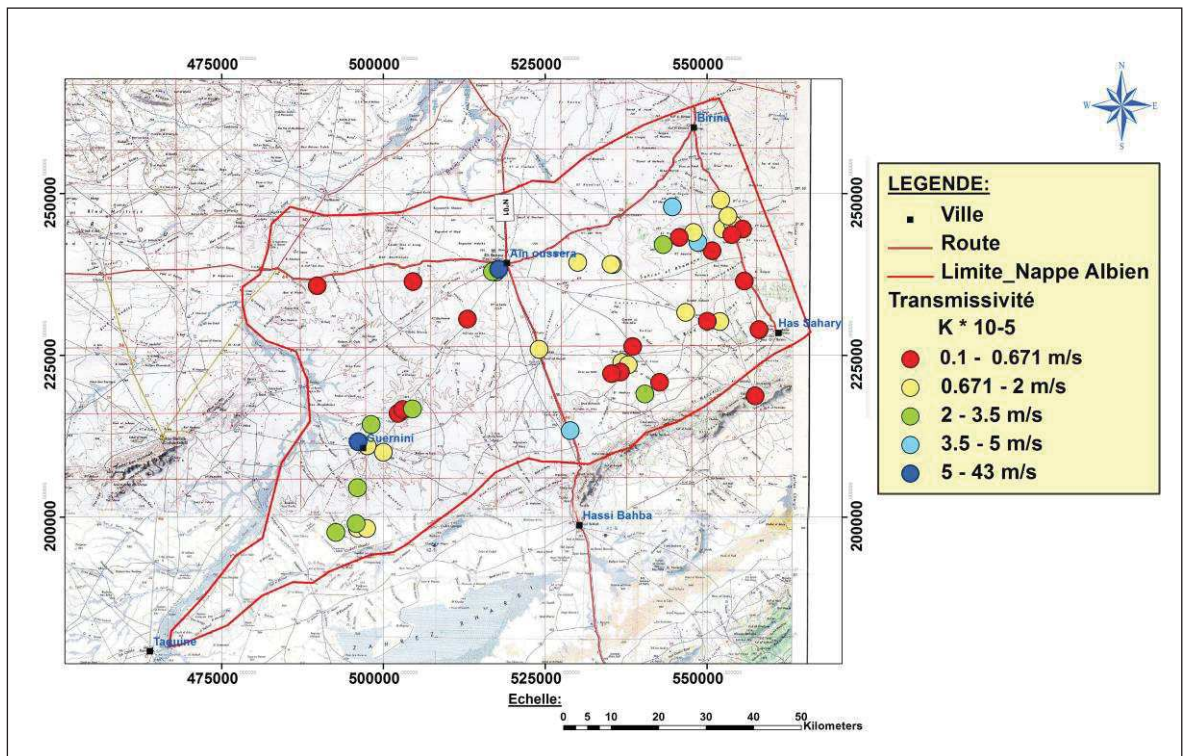
m/s et $43 \cdot 10^{-5}$ m/s, par contre les faibles valeurs sont enregistrées Sud-Est et Nord-Ouest de la zone d'étude. Les valeurs sont comprises entre $0.1 \cdot 10^{-5}$ et $2 \cdot 10^{-5}$ m/s (Figure.III.9).

III.4.3. Les débits spécifiques issus des forages

Le débit spécifique est défini comme le débit pompé dans un forage par unité de rabattement. Il nous permet de déterminer les zones plus productives. Le débit spécifique de la nappe de l'Albien oscille entre 0.032 et 7.5 l/s/m. Les zones les plus productives se localisent dans la zone de sersou et au Nord-Est de la plaine (Figure.III.10).

III.4.4. Coefficient d'emmagasinement

Il traduit la capacité de la nappe à libérer de l'eau sous l'effet d'un abaissement de la charge hydraulique. Les valeurs du coefficient d'emmagasinement de la nappe d'eau d'Ain Oussera



oscillent entre $0.93 \cdot 10^{-3}$ et $1,3 \cdot 10^{-3}$ (Ayad, 1984).

Fig.III.9 : Carte de la perméabilité de l'Albien inférieur

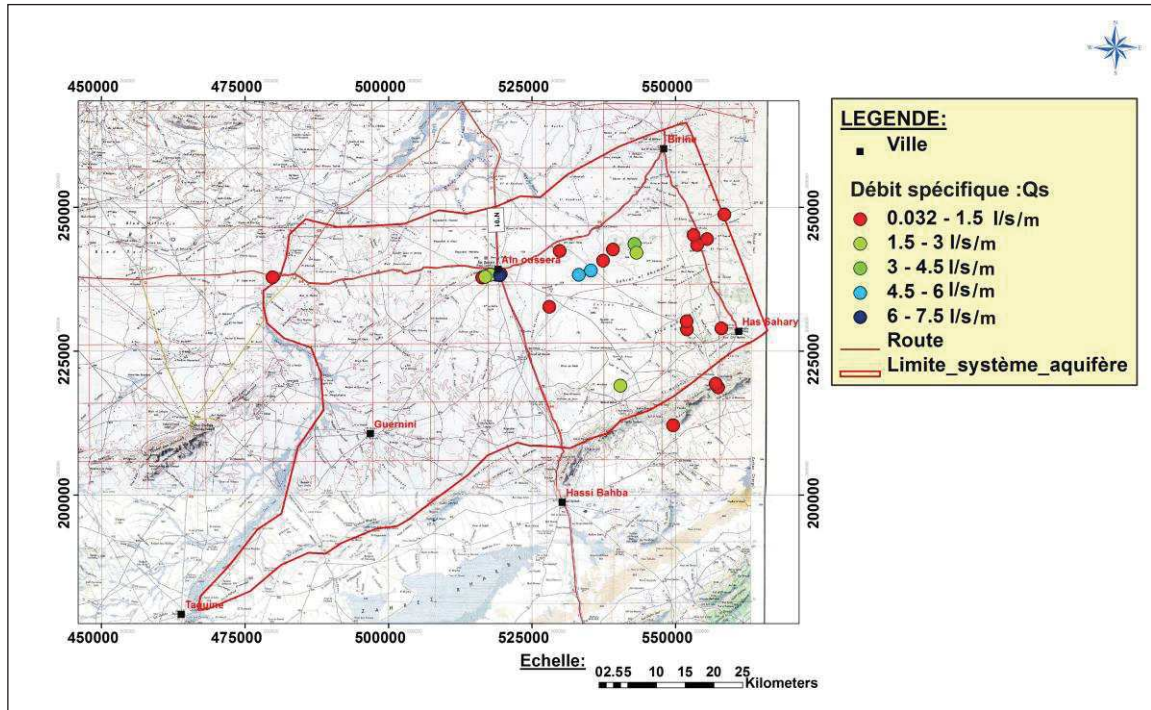


Fig.III.10 : Carte des débits spécifiques de l’Albien inférieur

III.5. Piézométrie

La plaine d’Ain Oussera a fait l’objet d’un suivi à partir des années 1980. Les chroniques piézométriques sont disponibles de 1981 à 2014 suivi par l’ANRH de Djelfa, soit 32 piézomètres. L’ensemble de ces piézomètres est implantés dans l’Albien.

La carte présentée en Figure III.11 précise la localisation des points de mesures suivis par l’ANRH

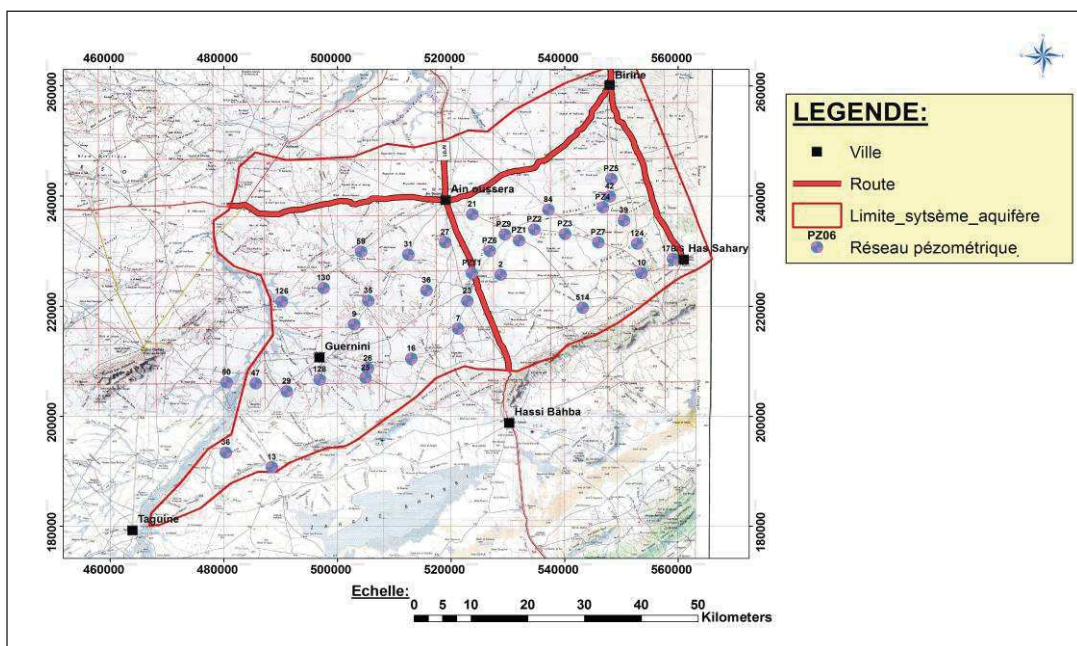


Fig.III.11 : Carte de surveillance de réseau piézométrique

La carte piézométrique a été établie sur la base des données de la campagne piézométrique effectuée par le service de l'ANRH en 2014 (figure.III.12). L'analyse de la carte isopièzes nous a permis de distinguer ce qui suit :

- L'allure des courbes isopièzes présentent une surface irrégulière, avec la présence des zones de dépression qui reflète l'influence de la surexploitation surtout dans la zone Est de la plaine. l'axe d'écoulement principal est de Sud vers le Nord.
- Les axes d'écoulement de la nappe ont permis de ressortir trois zones d'écoulement différentes :
 - Zone de Had Sahary : les courbes isopièzes sont parallèle aux l'affleurement des grès de l'Albien, et qui traduisent une alimentation latérale à partir du massif de la bordure Sud-Est. Les lignes piézométriques sont serrées et qui revient à la faible perméabilité de la formation aquifère. La zone se caractérise par un gradient hydraulique très élevé, il varié entre 0.89% et 1.23%. La côte piézométrique est de 800 m.
 - Zone centre : l'allure des courbes isopièzes montrent un écoulement convergent à partir de sersou vers la région de Benhar, et qui est du à l'influence du pompage par les forages d'alimentation en eau potable.
La zone se caractérise généralement par un élargissement des courbes isopièzes qui traduit la bonne perméabilité de la formation aquifère.
Le gradient hydraulique varié entre 0.3% et 0.56%.
 - La zone de Guernini : les lignes d'écoulements est subparallèle à Oued Touil, anis nous remarquons la présence d'une convergence des l'axes d'écoulement au nord de la région de Guernini, et peut être explique par une alimentation souterraine de la nappe à partir de Oued Touil.
Le gradient hydraulique dans la zone varié entre 0.4% et 0.542%. La côte piézométrique dans cette zone est de 675m.

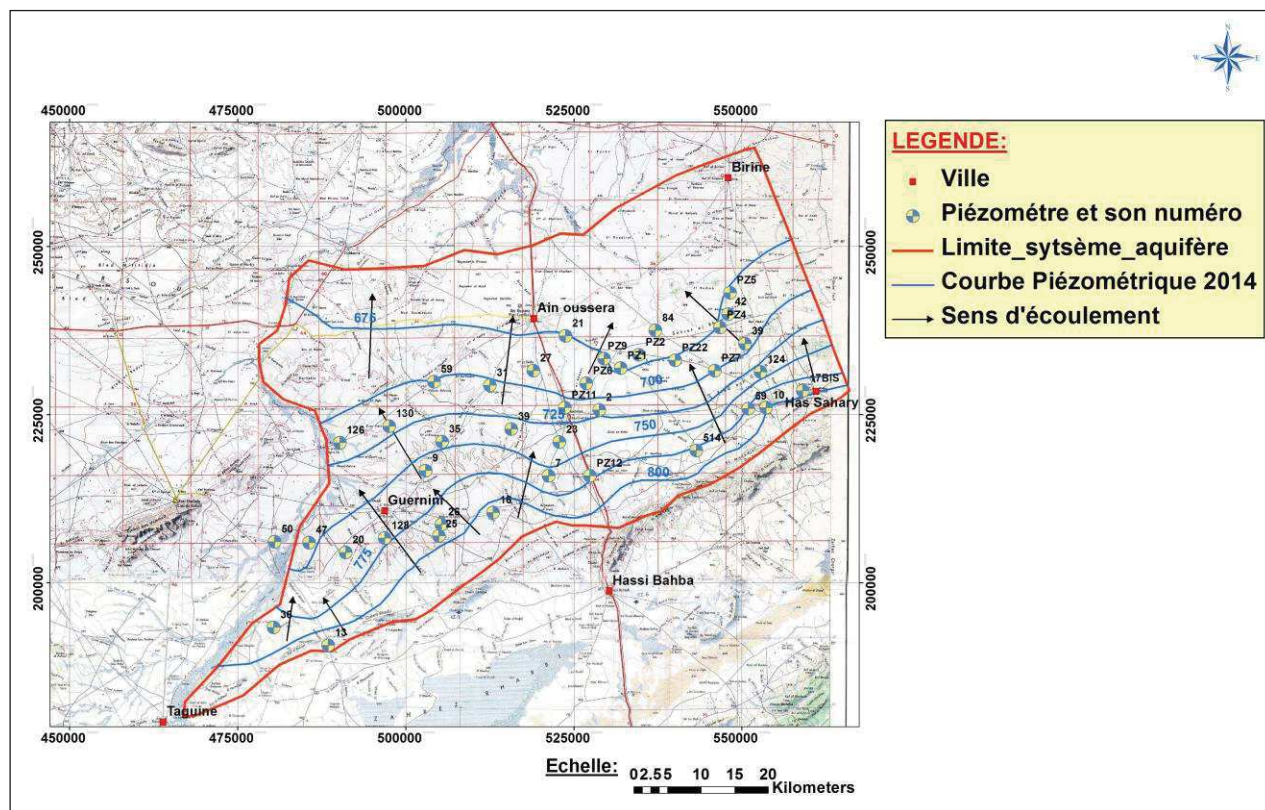


Fig.III.12 : Carte piézométrique de la nappe de l'Albien inférieur (Mai 2014)

III.6. Bilan hydrique du système aquifère

Quatre sources principales d'alimentation de la nappe de l'Albien ont été définies :

- Infiltration des eaux de précipitation sur les affleurements des grès de l'Albien
- Alimentation souterraine par les eaux des nappes aquifères sus-jacentes et sous-jacentes qui peu vent constituer des entrées mais également des sorties.
- Infiltration le long d'Oued Touil.
- L'apport souterrain à partir de la bordure Sud du système aquifère.

III.6.1. Infiltration directe des précipitations

La pluviométrie moyenne précipitée sur la plaine d'Ain Oussera est de 226.15 mm.

Les bilans hydrologiques été pour les deux stations Ain Oussera et Ksar Challala nous ont permis d'estimer la portion de précipitation qui alimente la nappe de l'albien, cette portion est de 13 mm/an soit 6.13% de la lame d'eau tombée sur la plaine.

D'après la géomorphologie du terrain et les cours d'eau existants dans la plaine, la ressource initiale de la plaine est la pluviométrie, elle est déterminée par la surface de l'impluvium efficace comprise entre 2 % et 9 % de la pluviométrie totale. une superficie de 3795 km² et un coefficient d'infiltration de 6.13 %, on peut estimer la recharge nette de la plaine par la formule suivante :

$$R = P * I * S$$

Avec :

R : La recharge annuelle ($H \text{ m}^3/\text{an}$)

P : La pluviométrie annuelle (m)

I : L'infiltration efficace

S : La superficie de la plaine (m^2)

Le volume total alimente les eaux souterraines de la plaine de Ain Oussera pour une année est donc estimé à $54,75 H \text{ m}^3/\text{an}$.

III.6.2. L'apport souterrain à partir de la bordure Sud du système aquifère

L'allure de la carte montre que les lignes équipotentiels sont parallèles aux s'affleurements des grès de l'Albien au Sud du système aquifère, ce qui s'explique par un apport souterrain vers la nappe d'eau. Cet apport peut être estimé par la loi Darcy, ayant pour formule : $Q = T \cdot I \cdot l$

$$Q = K \cdot I \cdot S = K \cdot I \cdot e \cdot L$$

K:coefficient de perméabilité en (m/s).

e : Epaisseur de la nappe en (m).

T : Transmissivité en m^2/s .

I : Gradient hydraulique.

L : longueur en mètre du front de la nappe à travers laquelle s'écoule le débit.

Remarque : à la base des résultats de calcul de la transmissivité et la carte piézométrique, on a divisé le front sud de la nappe en trois secteurs. Les calculs sont motionnés dans le tableau.III.1

Tableau.III.1 : l'apport souterrain vers la nappe de l'Albien

Longueur secteur « l » (m)	Transmissivité « T » 10^{-3} (m^2/s)	Gradient hydraulique « i » %	Q (m/s)	Q Hm^3/an
25287.7	0.50	1.33	0.168	24.50
53373.52	1.75	0.595	0.555	
26041	0.50	0.42	0.054	
Total			0.777	

III.6.3. Relation Nappe – Oued

Le réseau hydrographique de la plaine d'Ain Oussera est peu développé, de nombreux Oueds sont secs la majeure partie de l'année. Les Oueds Touil, Cedraia, El Mouillah, et Guernini présentent des bassins relativement développés. A l'Est de la ligne Ain Oussera – Guelt-Es Stel, les Oueds, sont peu importants.

L'oued Touil est le seul cours d'eau quasiment permanent sur la plaine d'Ain Oussera. Le débit de cet oued est généralement très faible (3 l/s) et est complètement sec en période sèche (Juillet – Août).

La carte piézométrique a mis en évidence qu'il ya un écoulement convergent à partir de oued Touil vers la nappe aquifère, qui peu être expliqué par un apport d'eau souterraine à partir de l'oued vers la nappe.

Les possibilités d'infiltration potentielle des eaux de l'oued vers la nappe albienne peuvent être décrites de la façon suivante :

- Pas d'infiltration en raison de la présence d'un écran étanche constitué par des argiles et marnes qui forment le lit de l'oued.
- Une alimentation indirecte par la nappe alluviale.
- Une alimentation directe par les zones d'affleurement des grés albiens.

Les zones d'infiltration vers la nappe sont probablement très localisées.

III.6.4. Les prélèvements

III.6.4.1. Prélèvement pour alimentation en eau potable

• Les débits mobilisés par les forages

Le tableau suivant indique les quantités d'eau prélevée en 2014 sur les forages AEP de la plaine d'Ain Oussera. Les volumes sont calculés à partir du débit d'exploitation des forages rapporté à une année, en considérant que les forages fonctionnent en continu selon la capacité de chacune d'eux (tableau.III.2).

Tableau.III.2 : Les Forages AEP exploitent dans la nappe d'eau Albienne (DRE)

N°	Nom_Forage	Site du Forage	Destignation	Coordonnées		Prof (m)	Debit (l/s)
				X	Y		
01	F4	Ain Oussera	Ain Oussera	518800	238250	200	30
02	F7	Ain Oussera	Ain Oussera	519550	238400	100	20
03	F6	Ain Oussera	Ain Oussera	516300	237800	200	10
04	F8	Ain Oussera	Ain Oussera	517800	238250	200	30
05	F9	Ain Oussera	Ain Oussera	519400	238200	200	40
06	F10	Ain Oussera	Ain Oussera	516825	237930	200	30
07	F3	Ain Oussera	Ain Oussera	519000	238500	200	30
08	UP3-F1	Guernini	Guernini	497200	210800	200	22
09	F1	Birine	Birine	544650	247900	152	17
10	F2	Birine	Birine	543000	247600	250	15
11	F3	Birine	Birine	545800	247450	-	25
12	F4	Birine	Birine	547000	247450	-	25
13	B3	Birine	Sidi Aissa	553800	243650	300	25
14	B1	Birine	Sidi Aissa	553200	246500	180	20
15	B3 bis	Birine	Sidi Aissa	553750	243450	300	20
16	B1bis	Birine	Sidi Aissa	553150	245150	315	20
17	B4	Birine	Sidi Aissa	552100	249000	250	20
18	B4 bis	Birine	Sidi Aissa	552950	245500	240	26
19	F2	Benhar	Ksar El Boukhari	535500	239200	300	20
20	F5	Benhar	Ksar El Boukhari	535150	239050	312	65
21	F7	Benhar	Ksar El Boukhari	539600	242700	300	30
22	F8	Benhar	Ksar El Boukhari	542570	244060	316	50
23	F4	Benhar	Ksar El Boukhari	533150	238250	300	30
24	F3	Had Sahary	Had Sahary	552000	228800	300	15
25	F2	Had Sahary	Had Sahary	558000	228950	288	4
26	F4	Had Sahary	Had Sahary	551950	230200	250	15
27	/	Had Sahary	Had Sahary	561000	228500	200	2
28	F1	Had Sahary	Ain Feka			200	30
29	F2	Had Sahary	Ain Feka			200	30
30	F3	Had Sahary	Ain Feka			200	30
31	F2	Bouira Lahdab	Bouira Lahdab	540400	219000	258	40
32	F1	Bouira Lahdab	Bouira Lahdab	538550	217250	200	4
33	KF1	KF1	El Khemis	490 500	221 300	200	18
34	Nombre Totale des forages = 34			Débit mobilisé (l/s)		808	

D'après les données fournies par la DRE et l'ANRH de Djelfa, le volume total prélevé sur les eaux souterraines pour l'année 2014, pour l'AEP, de la plaine d'Ain Oussera est donc estimé à 25.48 Hm³/an, sachant que 15,79 Hm³/an est destiné à la population de la plaine et 10,28 pour les autres wilayas (Figure.III.13).

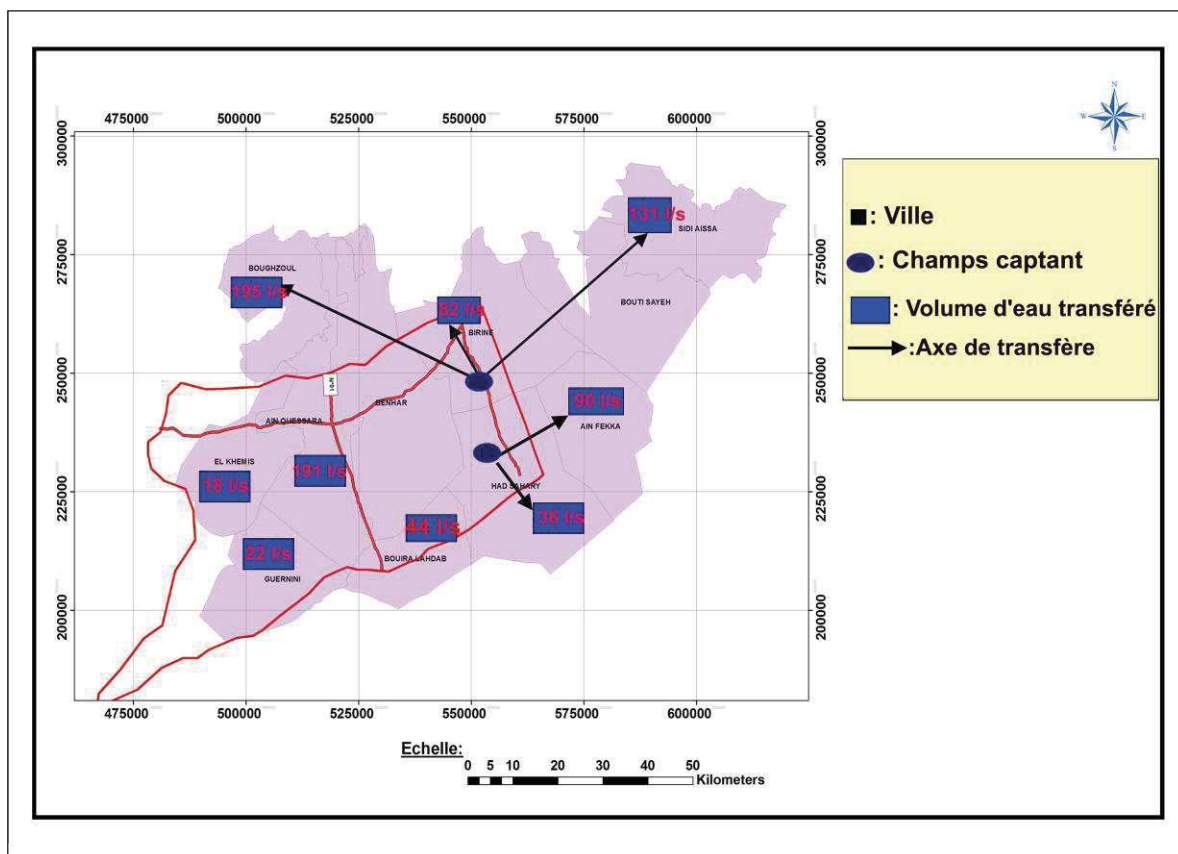


Fig.III.13 : Carte de volume d'eau mobilisé de la nappe d'Ain Oussera (DRE, 2014)

III.6.4.2. Prélèvement agricole

• Estimation du volume prélevé à partir de la superficie irriguée et des points d'eaux

Les surfaces cultivées de la plaine d'Ain Oussera sont concentrées dans certaines zones et sollicitent localement la nappe albienne de manière intensive.

Le type de culture dominant est la culture arboricole, en particulier les arbres fruitiers (Pommiers, Poiriers, ...). Il existe également des cultures fourragères (sorgho, luzerne), et localement de rares cultures maraîchères. La zone du Sersou, au Sud-ouest de Birine concentre la plupart des cultures de la plaine. Les autres surfaces cultivées se situent pour l'essentiel au Sud et au Sud-ouest de la ville d'Ain Oussera. A Guernini, les quelques périmètres irrigués sont à l'abandon. Enfin, les cultures localisées le long de l'oued Touil s'étendent sur les zones d'épandages de crues, et ne sollicitent pas la nappe albienne.

Le lancement des programmes du FNDRA en 2000 se traduit par un fort accroissement de la quantité de surfaces irriguées à partir de cette date. Les données fournies par la DSA concernant les surfaces irriguées pendant l'année 2016 sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau.III.3 : Les superficies des cultures irriguées (DSA)

Commune	Cultures Maraîchères	Cultures Fourragères	Céréales	Arboriculture	Total irrigué (Ha)
Had Sahary	218	280	510	759	1767
Bouira Lahdab	113	70	250	462	895
Birine	890	320	650	716	2576
Benhar	486	215	419	5227	6347
Ain Oussera	0	100	105	1177	1382
Guernini	0	10	82	59	151
El Khemis	04	50	50	46	150
Total	1711	1045	2066	8446	13268

Un recensement BIRH (Bureau d'inventaire des ressources Hydrauliques) a été réalisé sur la plaine d'Ain Oussera par l'ANRH en 1994 et actualisé en 2014, et pour avoir une idée sur les prélèvements jusqu'à l'année 2014.

D'autres part certains puits sont en cours de réalisation, ou à l'abandon. Ainsi le nombre d'ouvrages recensés dans l'inventaire BIRH captant effectivement la nappe albienne se situe plus vraisemblablement autour de 980 points d'eau (Figure.III.14).

Le Tableau III.4 suivant présente les résultats de deux estimations du débit annuel prélevé sur la nappe albienne. Le premier calcul est effectué à partir du débit maximal de pompage autorisé par hectare, le second calcul est effectué à partir des données issues de l'inventaire BIRH et les ouvrages censés être réalisés. Pour les deux calculs, nous avons considéré, après discussion avec la DSA, une durée journalière de pompage moyenne de 3 h/j lissée sur l'année.

Tableau.III.4 : Estimation des prélèvements sur la nappe albienne

Données utilisées pour le calcul	Volume annuel prélevé (en Hm ³ /an)
Débit de pompage autorisé : 0.8 L/s/ha Surface irriguée considérée : 13268 ha (DSA)	26.15
Nombre des points d'eaux : 980 (ANRH) Débits de pompage moyen : 06 L/s	25.63

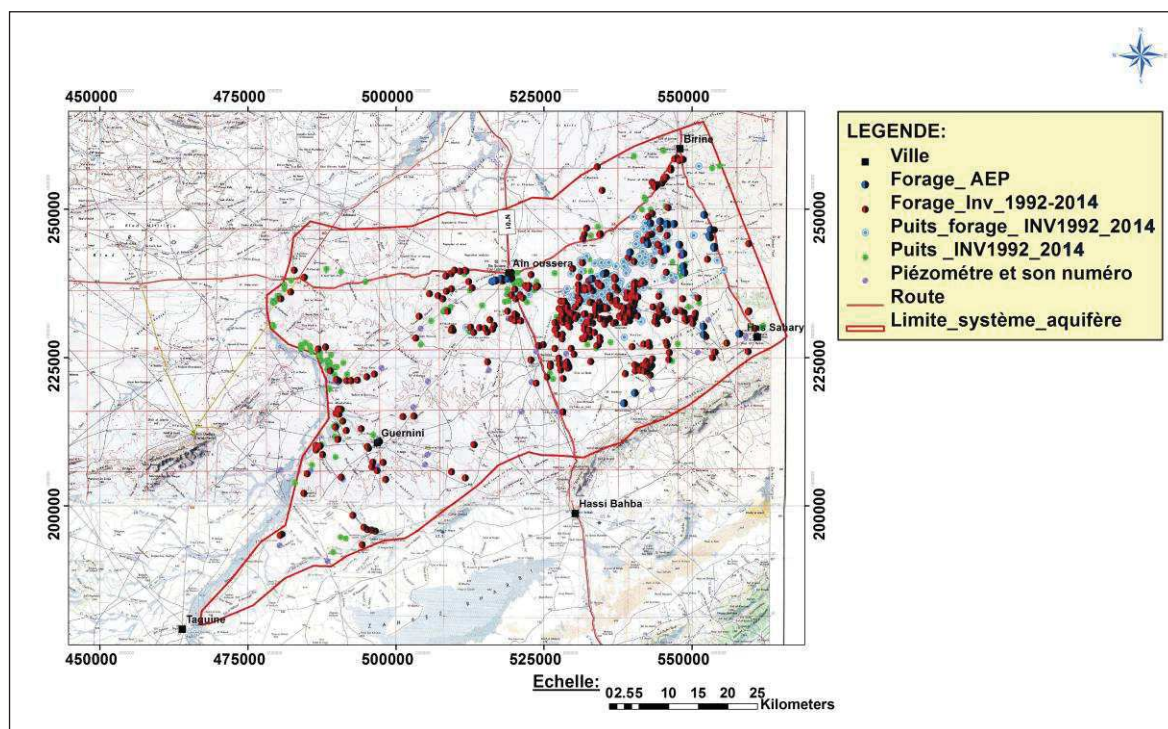


Fig.III.14 : Carte des points dans la nappe d'Ain Oussera (Inventaire 2014).

III.6.4.3. Le volume d'eau souterrain sortant à partir de la bordure Nord

Les calculs sont reportés au tableau ci-dessous.

Tableau.III.5 : Emission à partir de la limite Nord du système aquifère.

Longueur secteur « l » (m)	Transmissivité « T » * 10 ⁻³ (m ² /s)	Gradient hydraulique « i » %	Q (m/s)	Q Hm ³ /an
13431	6.25	0.595	0.499	43.39
33927	3.75	0.595	0.757	
4952	1.75	0.595	0.052	
30990	0.525	0.42	0.068	
Total			1.376	

III.6.5. Bilan général de la nappe Albienne

Les résultats des calculs du bilan hydraulique de la nappe de l'albien sont mentionnés dans le tableau ci-dessous.

Tableau.III.6 : Bilan hydraulique de la nappe Albienne.

Entrant	Q (Hm ³ /an)	Sortant	Q (Hm ³ /an)
Infiltration directe des précipitations	52.75	Prélèvement AEP	25.48
Apport souterrain à partir du flanc Sud	24.50	Prélèvement IRR	25.63
		Emission souterrain à partir du flanc Nord	43.39
Total	77.25		94.50
Bilan hydraulique de la nappe		Q = 17.25 Hm ³ /an	

L'observation des résultats de calcul montre que :

- Le bilan hydraulique annuel de la nappe de l'Albien est déficitaire de 0.519 m/s, ceci est traduit en réalité par le baissement contenu des niveaux piézométriques.
- L'infiltration des eaux de la précipitation constitue la source principale de l'alimentation de la nappe.

III.7. Conclusion

La plaine d'Ain Oussera renferme diverses formations aquifères avec des potentialités hydrauliques différentes. Ces formations sont représentées par le remplissage du Quaternaire, les grès du Miocène, les calcaires du l'Eocène inférieur, du Turonien, du cénomanien et des grès Albo-Barrémiens.

Les grès de l'Albien inférieur constituent l'aquifère principal dans la région d'étude. C'est une nappe libre à grande extension et une épaisseur assez appréciable, ce dernier varie entre 83 à 225 m et sa valeur moyenne de la formation est de 150 m.

L'étude piézométrique a montré que l'écoulement principal de la nappe est de Sud vers le Nord, et l'allure des courbes isopièzes de la carte piézométrique ont mis en évidence les zones d'alimentation souterraine de l'aquifère. Cette alimentation se fait à partir du massif de la bordure Sud du système aquifère. Le gradient hydraulique est beaucoup plus élevé au Sud qu'au Nord, il oscille entre 0.3 % et 1.23%.

La transmissivité varie entre $1.25 \cdot 10^{-2}$ m²/s et $0.50 \cdot 10^{-3}$ m²/s, La bonne transmissivité caractérise la zone Nord-Est de la zone d'étude.

Perméabilité présente la même répartition spatiale que la transmissivité, et les valeurs varient entre $0.1 \cdot 10^{-5}$ m/s et $4.3 \cdot 10^{-4}$ m/s. Le coefficient d'emménagement varie entre $0.93 \cdot 10^{-3}$ et $1.3 \cdot 10^{-3}$.

Le bilan hydraulique montre que l'alimentation principale de la nappe de l'Albien se fait par l'infiltration directe des eaux de la précipitation et qui constitue 68.28% du volume total d'eau entrant dans la nappe aquifère.

Le bilan hydraulique en générale est déficitaire, et la recharge est estimée de 77.25 Hm³ /an, tandis que les prélèvements sont de 94.50 Hm³ /an.

CHAPITRE IV

HYDROCHIMIE ET QUALITE DES EAUX

SOUTERRAINES DU SYSTEME AQUIFERE DE LA

PLAINE D'AIN OUSSERA

IV. Introduction

L'eau souterraine est porteuse d'un message sur sa provenance et sur l'origine de sa minéralisation, le bilan hydrologique global de sa zone de recharge et les apports des différentes composantes de l'hydrosystème, sur son temps de résidence dans le réservoir et sur sa contamination naturelle ou artificielle (Mudry, 2008).

L'hydrochimie est un puissant outil de prospection hydrogéologique permettant de contribuer à la compréhension des circulations des eaux souterraines en se basant sur le mécanismes d'acquisition et d'évolution du chimisme dans les aquifères. En effet l'étude hydrochimique a pour but la classification des eaux en fonction de leurs faciès chimique et la détermination des origines de la minéralisation (Schoeller, 1962; Castany, 1982).

La qualité des eaux souterraines dans la plaine d'Ain Oussera est largement déterminée à la fois par les processus naturels (lithologie, eaux souterraines, qualité des eaux de recharge et interactions avec d'autres types d'eau) et anthropiques (agriculture, développement urbain) et l'exploitation croissante des ressources en eau (Mebrouk et al, 2007 ; Maoui et al, 2010).

Le but de cette étude hydrochimique est la détermination des faciès chimiques des eaux souterraines de la plaine d'Ain Oussera et l'appréciation de la potabilité des eaux et leurs aptitudes à l'irrigation.

IV.1. Méthodologie

IV.1.1. Prélèvement

Les prélèvements ont été effectués pendant le mois d'octobre 2014 à partir de 19 points d'eau, le choix des points du prélèvement a été effectué d'une manière d'avoir une répartition régulière et homogène sur toute la plaine d'Ain Oussera. Notons que nous disposons des résultats d'analyses chimiques réalisées par l'ANRH Djelfa entre la période 1996 et 2008. Ces analyses seront prise en considération dans cette étude, car elles vont nous permettre de suivre l'évolution temporelle de quelques éléments chimiques (Fig.IV.1). Les analyses sont effectuées au laboratoire de l'ANRH (Alger), le (Tableau. IV.1) présente les statistiques descriptives des analyses d'eau.

IV.1.2. Balance ionique

On calcule la balance ionique pour déterminer le pourcentage des erreurs pendant les analyses (la fiabilité des analyses), le pourcentage des erreurs tolérés théoriquement devrait être inférieur ou égale 8%, et se calcule comme suit:

$$e = [(\Sigma \text{ cations} - \Sigma \text{ anions}) / (\Sigma \text{ cations} + \Sigma \text{ anions})] * 100$$

Tableau.IV.1: Résultats des analyses physico-chimiques des eaux de la nappe albienne d'Ain Oussera (Valeurs CE (mS/cm) et concentrations ioniques (mg/l) pour 19 échantillons)

	pH	CE	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
Moyenne	7.16	1.73	153.36	56.48	123.68	14.37	197.44	271.63	384.3	27.66
Minimum	6.82	0.47	60	17	19	2	19.97	18.45	137.25	0.01
Maximum	7.48	3.76	397.7	119.3	528	52	652.38	1502	1418.25	78.5
Ecart-type	0.15	1.04	96.05	34.6	117.87	16.12	167.06	355.05	347.37	26.3

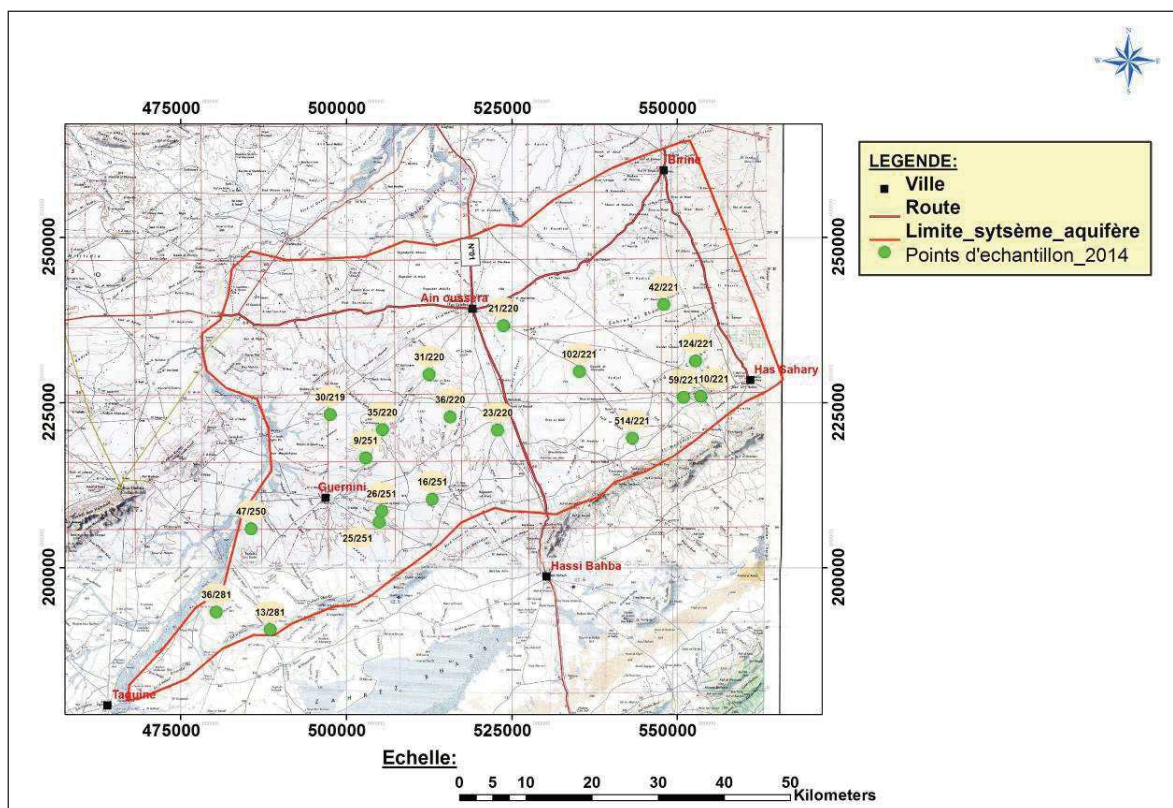


Fig.IV.1: Carte de situation des points d’eau échantillonnés dans la plaine d’Ain Oussera

IV.2. Interprétation des résultats

IV.2.1. Paramètres physique de l’eau

IV.2.1.1. Conductivité électrique

La conductivité électrique d’une eau est la conductance d’une colonne d’eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1cm² de surface et séparées l’une de l’autre de 1cm. Elle est l’inverse de la résistivité électrique.

La conductivité électrique des eaux de la nappe d'Ain Oussera présente des variations d'un point à l'autre, la valeur maximale est enregistrée au niveau du forage 47/250 qui est de 3.76 mS/cm, par contre la valeur minimale est enregistrée au niveau du forage 102/221, elle est de 0.47 mS/cm (Fig.IV.2).

Analyse spatiale de la conductivité montre que les fortes valeurs de conductivité se concentrent dans la partie Sud-Ouest de la plaine, surtout le long d'oued Touil. Ceci est du probablement à la recharge de la nappe par les eaux du surface drainées par oued Touil. Dans la partie Est de la plaine la conductivité est faible, qui peut être expliqué par les apports d'eaux douces provenant de la zone d'alimentation de la nappe (les affleurements de l'albien au Sud de la plaine).

Les campagnes chimique réalisées par l'ANRH entre la de la période 1996 et 2008 montrent qu'il existe une évolution temporelle remarquable au Sud-Ouest de la plaine, notamment au Nord de la région de Taguine.

La superposition de la carte piézométriques et la carte de la conductivité montre que la conductivité des eaux variées de sud vers le Nord de la plaine, dans le sens d'écoulement de la nappe aquifère.

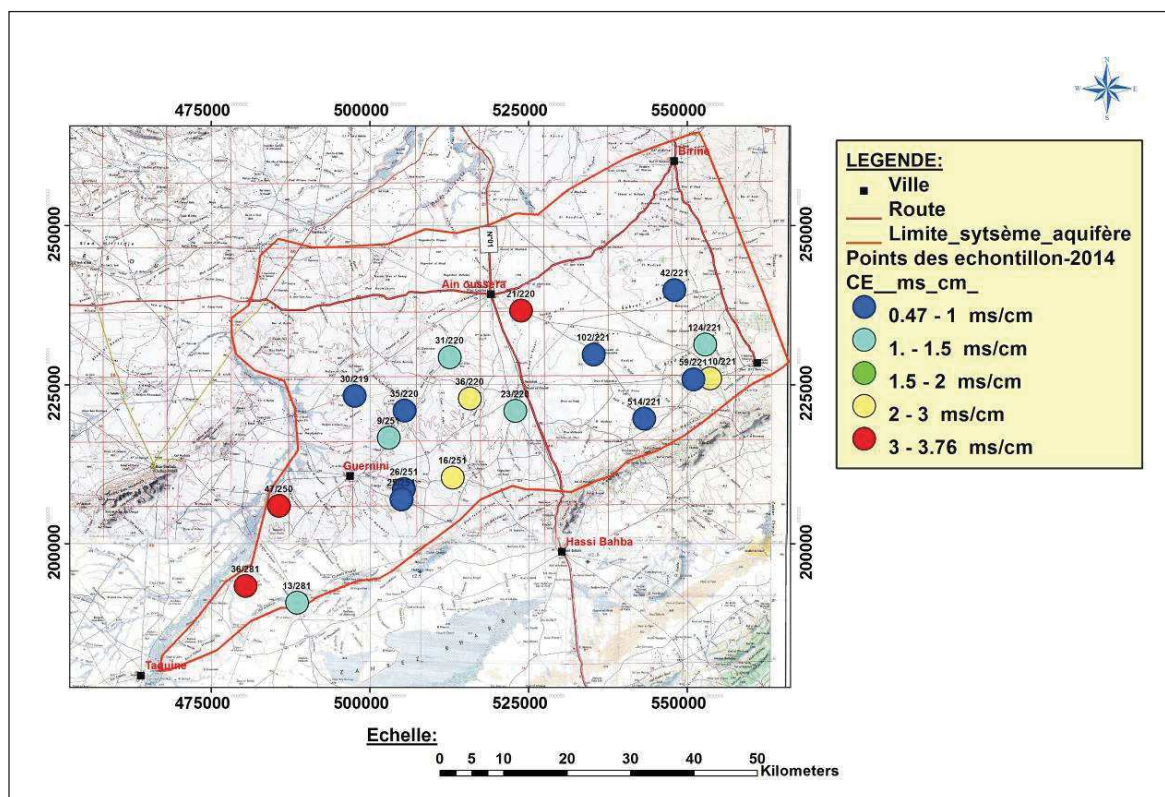


Fig.IV.2: Carte répartition spatiale de la conductivité électrique dans la nappe albiense d'Ain Oussera (Octobre 2014)

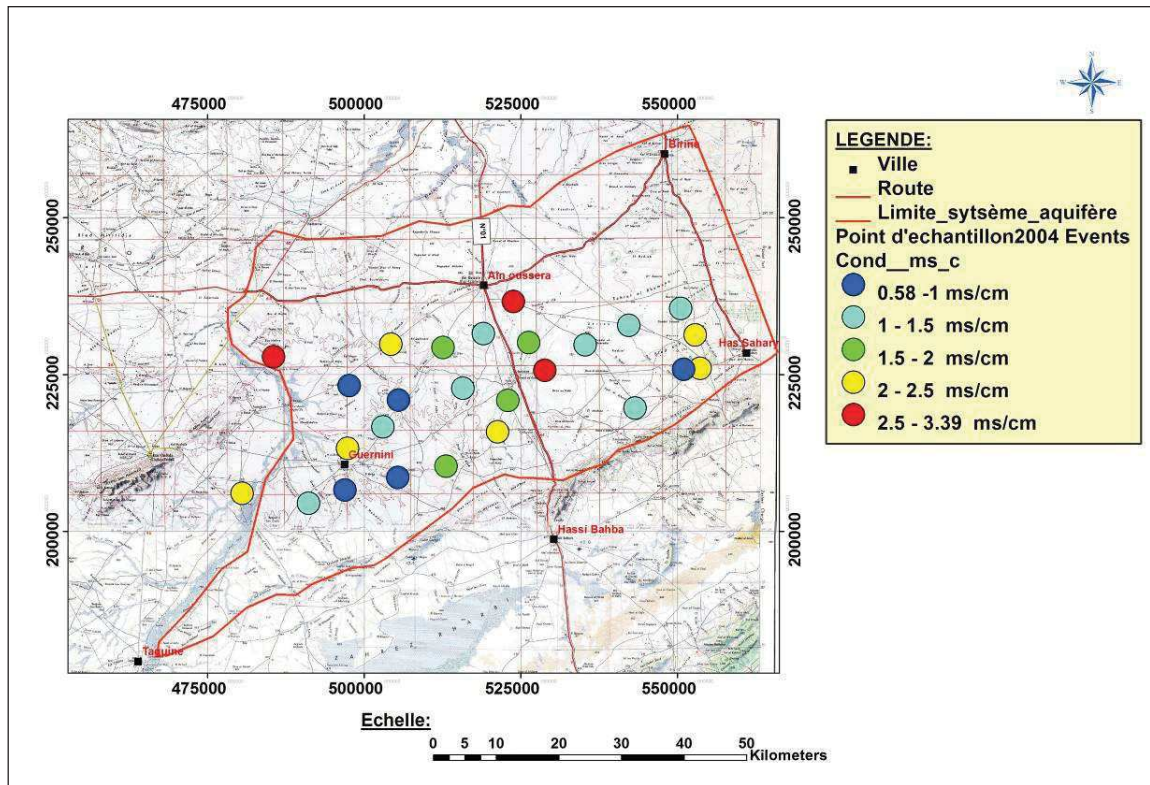


Fig.IV.3: Carte répartition spatiale de la conductivité électrique dans la nappe albienne d'Ain Oussera (Septembre 2004)

IV.2.1.2. Degré de la minéralisation des eaux

Le tableau ci-dessous montre que la majorité des eaux de la nappe aquifère de l'albien d'Ain Oussera ont un degré de minéralisation moyen. Ces valeurs restent toujours inférieures aux limites des normes de la potabilité qui est de $CE < 1.25 \text{ mS/cm}$.

Tableau.IV.2: Classification des eaux de la nappe en fonction de la Conductivité

Conductivité ($\mu\text{S/cm}$) à 25 °C	Degré de la minéralisation	Nombre de points	Pourcentage %
< 450	Très faible	/	/
450 - 750	Faible	01	5.26
750 - 1500	Moyen	10	52.63
1500 - 2300	Moyennement élevé	02	10.52
2300 - 3000	Elevé	03	15.78
> 3000	Très élevé	03	15.78

IV.2.1.3. Potentiel hydrogène de l'eau (pH)

Le pH se définit comme les logarithmes décimaux des inverses de H^+ et OH^-

$$PH = \log ([H^+]^{-1}) = -\log [H^+]$$

Donc le pH est un paramètre qui caractérise l'acidité ou l'alcalinité de l'eau par la concentration en ions H^+ .

Pour une eau pure à 25°C

- pH = 7 la solution est dite neutre.
- pH < 7 la solution est dite acide.
- pH > 7 la solution est dite basique.

L'eau de nappe albienne présente une caractéristique alcaline bicarbonatée du fait que le pH est inférieur à 8.3, les valeurs du pH variées entre 6.8 et 7.48.

IV.2.1.4. TDS (Total dissolved solids)

Ce paramètre est lié à minéralisation des eaux, la valeur maximale de TDS est enregistrée au forage (21/220) avec 3074 mg/l, est qui situé au Sud de la ville d'Ain Oussera, par contre la valeur minimale est de 386 mg/l est enregistrée au niveau du forage (102/221).

IV.2.1.5. Dureté Total ou degré hydrotimétrique totale (D.H.T)

Le degré hydrométrique ou la dureté d'une eau correspond à la somme des concentrations en calcium et en magnésium, elle est exprimée en degré français (°F).

$$DHT = r Ca^{++} + r Mg^{++} \text{ (en méq/l)}$$

$$DHT = (r Ca^{++} + r Mg^{++}) * 5 \text{ (en degré français } ^\circ F \text{)}$$

Le tableau IV.3 montre que la dureté des eaux de la nappe d'aquifère de l'Albien est comprise entre 22 et 139°F. On peut classer 9 échantillons d'eau comme très dure au niveau du forage 47/250 près d'oued touil, 5 échantillons d'eau dure et 5 échantillons d'eau assez douce.

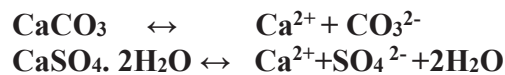
Tableau.IV.3: Dureté des eaux en °F (W. THEOBALD et A. GAMA, 1969)

D.H.T (en °F)	0 -7	7-22	22-32	32-54	>54
Qualification de l'eau	Douce	Modérément douce	Assez douce	Dure	Très dure
Pourcentage des points	0	0	26.32	26.32	47.36

IV.2.2. Paramètres chimiques

IV.2.2.1. Calcium (Ca⁺⁺)

La présence du calcium Ca²⁺ dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles, soit à la dissolution des formations carbonatées (CaCO₃), soit la dissolution des formations gypseuses (CaSO₄).



Les résultats d'analyse obtenus au laboratoire montrent que les teneurs varient entre 60 mg/l (102/221) et 397.7 mg/l (47/250). Les fortes valeurs se localisent dans la partie Sud-Ouest de la plaine. L'apport de calcium est assuré par l'infiltration des eaux surface d'oued Touil qui se charge dans son parcours par des éléments gypsifère.

IV.2.2.2. Magnesium (Mg⁺⁺)

Il provient de la dissolution des roches des calcaires dolomitiques et de la dolomie. La répartition spatiale des teneurs de magnésium dans la zone d'étude est identique à celle de calcium, la teneur maximum est enregistrée au sud de la ville d'Ain Oussera au niveau forage (47/250) avec 119.3 mg/l, et la valeur minimum est enregistrée au forage (102/221) avec 17 mg/l, qui se situe au centre de la plaine

L'origine du magnésium provient de la dissolution des roches calcaires dolomitiques du crétacé supérieur sous l'influence du gaz carbonique dissous dans l'eau.

IV.2.2.3. Sodium (Na⁺)

Le sodium se présente dans la nature dans les roches saline (roche de sel) il est plus nombreux dans la nature que potassium qui se trouve sous forme de chlorures dans les formations évaporitiques.

Les concentrations en sodium des eaux de la plaine sont comprises entre 19 mg/l (forage 102/221) et 528 mg/l (forage 47/250). Les valeurs les plus élevées supérieures à 150 mg/l se localisent dans la partie Ouest et Sud-Ouest de la plaine.

IV.2.2.4. Potassium (K⁺)

Les valeurs de potassium varient entre 02 mg/l pour le forage (102/221) et 52 mg/l pour le forage (47/250). Les résultats montrent que la plupart des points d'eau ont une concentration inférieure à la limite admissible de la potabilité de 12 mg/l (selon les normes l'OMS).

IV.2.2.5. Chlorures (Cl⁻)

Les chlorures sont toujours présents dans les eaux naturelles en proportions variables, leur présence dans l'eau souterraine résulte de la dissolution des sels naturels par la dissolution de la sylvite (KCl) et de l'halite (NaCl).

Les analyses montrent que la majorité des points d'eaux présentent des teneurs inférieures à la norme limite de la potabilité, la norme d'OMS recommande que la teneur en chlorure des eaux ne dépasse pas 250 mg/l (Rodier, 2009).

Les valeurs du chlorure des eaux de l'aquifère de la plaine d'Ain Oussera oscillent entre 9.97 mg/l (Forage 102/221) et 652.38 (Forage 47/250).

La répartition spatiale de chlorure est identique à celle du Sodium, ce qui confirme que l'apport de ces deux éléments provient de la même source salifère.

IV.2.2.6. Les sulfates (SO₄²⁻)

La présence des d'ions sulfatés dans de la nappe gréseuse de l'albien liée à la dissolution des formations gypsifères. Les teneurs déterminés sont comprises entre 18.45 mg/l (forage 102/221) et 1512 mg/l (forage 47/250). Les fortes valeurs se localisent dans partie Sud-Ouest de la plaine et au Sud de la ville d'Ain Oussera est liée à la dissolution des formations gypsifères du Cénomaniens qui affleurent à la bordure sud de l'aquifère (Oukat chargui et Gharbi).

D'une manière générale l'eau de la nappe de l'Albien d'Ain Oussera se caractérise par des teneurs inférieures à la limite admissible pour la potabilité selon la norme d'OMS (Fig.IV.4).

IV.2.2.7. Bicarbonates (HCO₃⁻)

Il est connu sous le terme titre alcalimétrique (TAC), il constitue l'alcalinité de l'eau. Les eaux de nappe de la région d'étude présentent des teneurs qui oscillent entre 137.25 mg/l (forage 102/221) et 1418.25mg/l (forage 47/250), les valeurs extrêmes de cet élément sont enregistrées dans la zone Ouest de la nappe aquifère.

Les apports des bicarbonates dans les eaux de la nappe albienne d'Ain Oussera est liée probablement à la dissolution des formations calcaires qui affleurent aux bordures Sud et Sud-Est de la plaine.

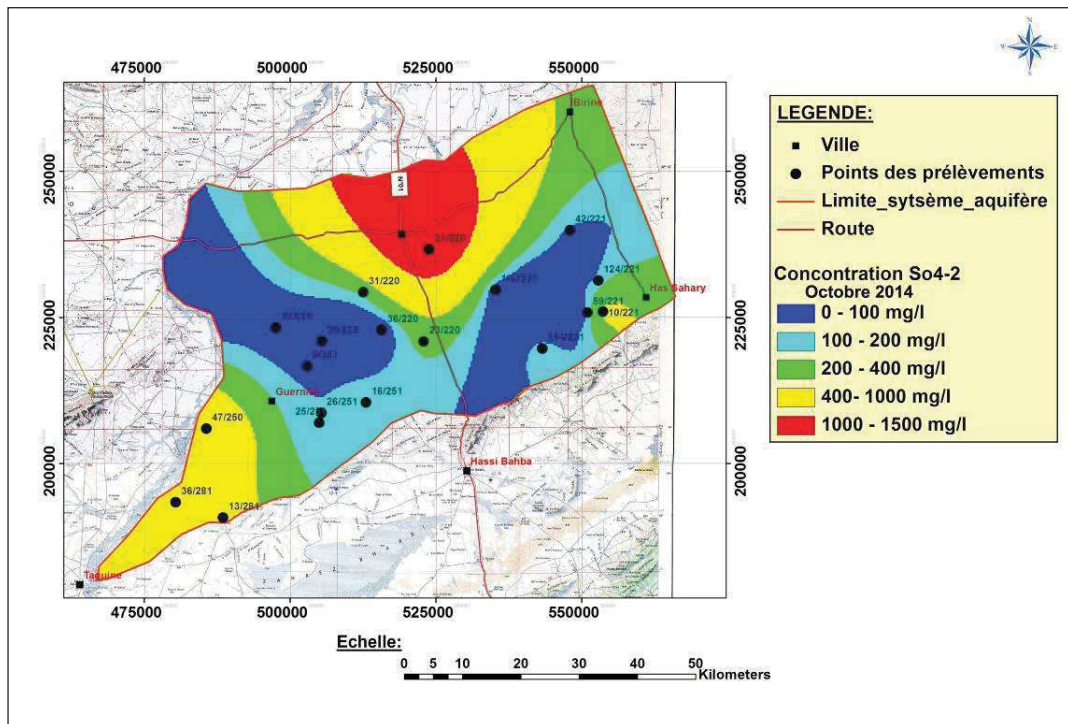


Fig.IV.4: Carte répartition spatiale des teneurs en sulfate (SO_4^{2-}). Octobre 2014.

IV.2.2.8. Nitrates (NO_3^-)

Il présente la forme la plus oxygénée de l'azote, c'est une forme très soluble sa présence dans l'eau souterraine est liée à l'utilisation intensive des engrais chimiques.

Les résultats de l'analyse montrent que 78.9% des points analysés présentent des concentrations des nitrates inférieures à La concentration maximale admissible de 50 mg/l (Rodier, 2009).

Les concentrations des nitrates varient entre 0.01 mg/l comme valeur minimum observé au niveau du Forage 59/221 et 78.59 mg/l comme valeurs maximum enregistrés au niveau du forage 47/250.

L'analyse spatiale de carte (Fig.IV.5) montre que les fortes teneurs se localisent dans les zones suivantes :

- La partie Sud-Est de la plaine (la ville Had Sahary) : les teneurs en nitrates sont supérieures à 75 mg/l, est qui revient probablement au rejet des eaux usées et des déchets domestiques, ce qui produit augmentation des nitrates.
- La zone Nord-Ouest de la ville d'Ain Oussera et la zone de Guernini: les teneurs en nitrates dépassent la norme de potabilité qu'est 50 mg/l, ces fortes concentrations reviennent à la présence des périmètres agricoles sur fertilisés par les engrais azotés.

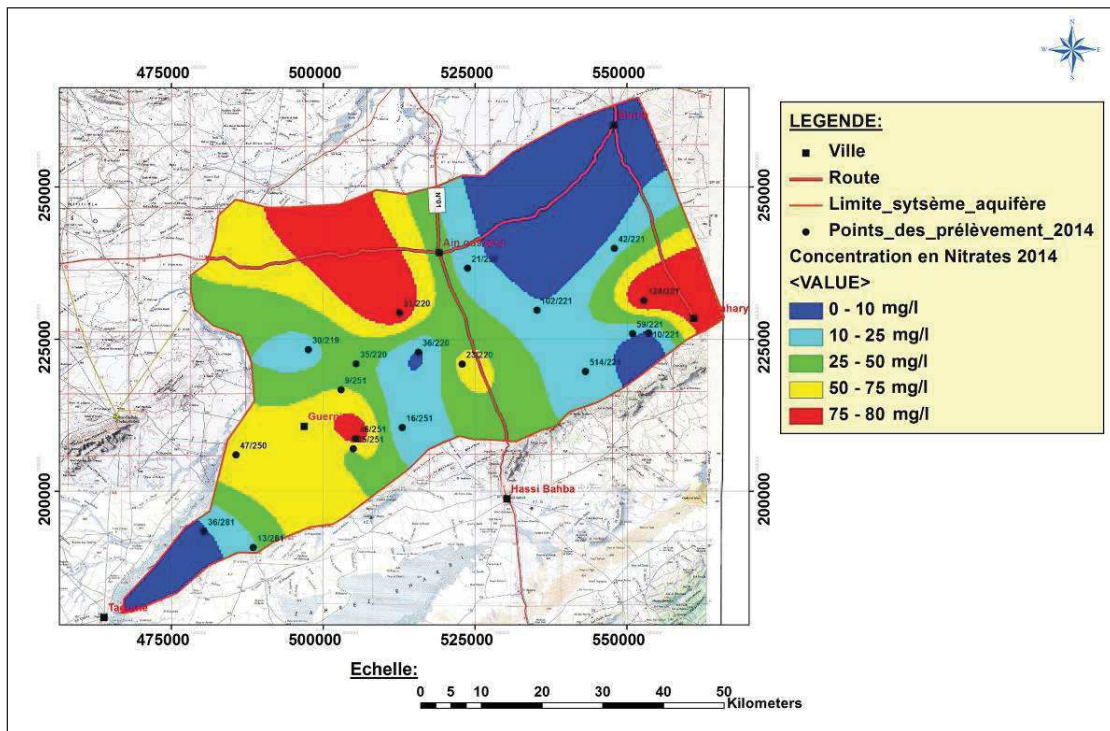


Fig.IV.5: Carte répartition spatiale des teneurs Nitrates (NO_3^-). Octobre 2014.

IV.2.2.9. Evolution des Nitrates (NO_3^-)

L'analyse des cartes des teneurs en nitrates réalisées à partir des campagnes chimiques effectuées entre la période 1992 et 2014 (Fig.IV.5.6.7), montrent l'existence d'une évolution remarquable des teneurs en nitrates en temps et en espace, surtout dans la zone Ouest et Sud-Est de la plaine, où les concentrations sont supérieures à la norme de potabilité, ceci peut être expliqué par :

- une pollution des de la nappe provoquée par l'infiltration des rejets des eaux usées dans les zones vulnérables.
- L'effet d'épandage des engrais azotés au niveau des périmètres irrigués

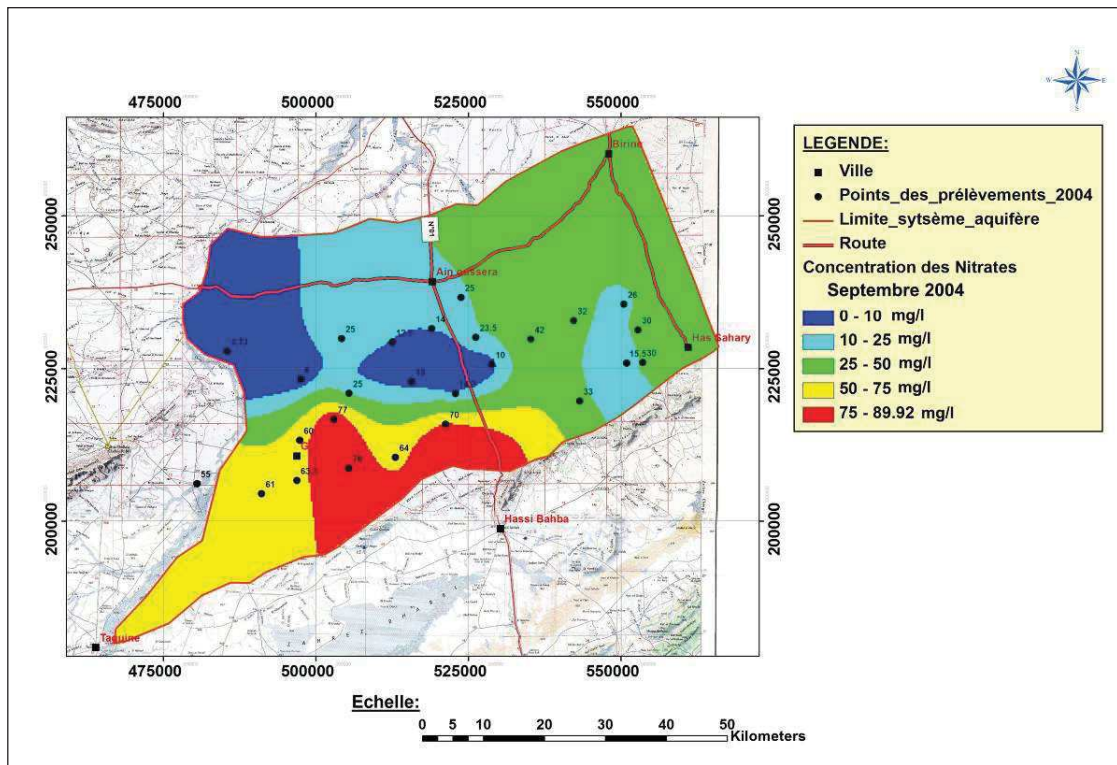


Fig.IV.6: Carte répartition spatiale des teneurs Nitrates (NO_3^-). Septembre 2004.

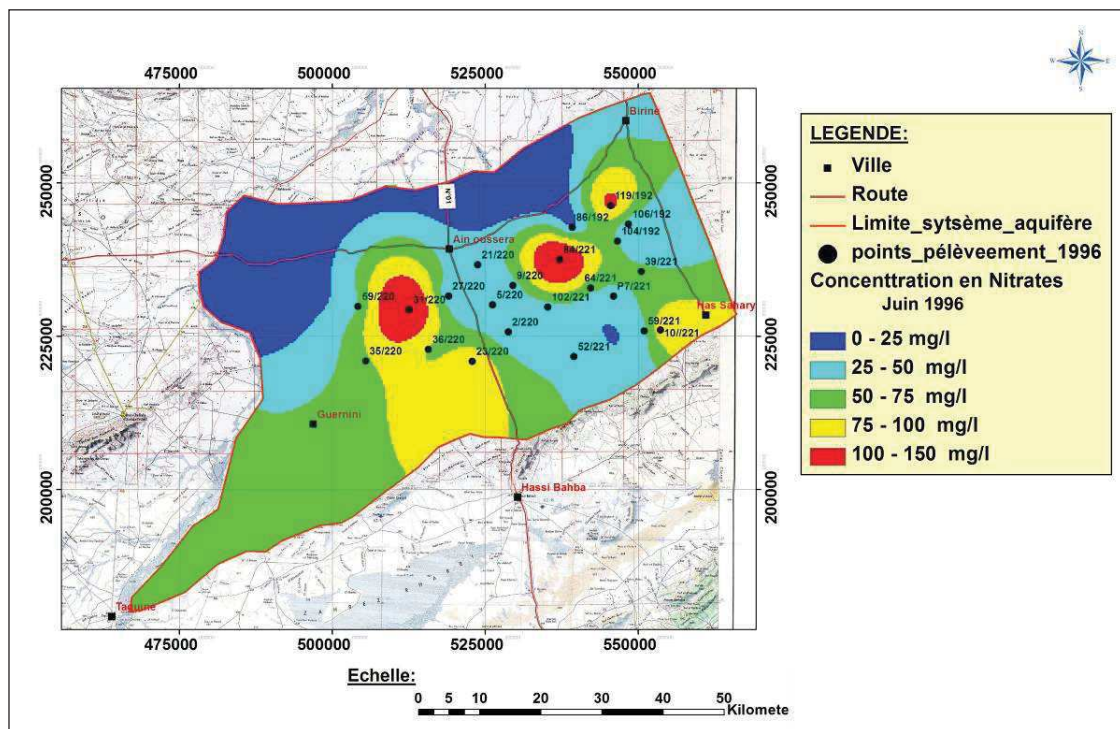


Fig.IV.7: Carte répartition spatiale des teneurs Nitrates (NO_3^-). Juin 1996.

IV.2.3. Le faciès chimique

Il s'agit d'une comparaison des compositions chimiques des points d'eaux analysées entre elles, notons que chaque concentration des ions majeurs caractérisant un environnement géologique. Pour une meilleure vision et une meilleure identification des faciès et de l'aspect qualitatif des eaux souterraines, ainsi que son évolution, la représentation graphique des résultats d'analyse, reste un outil incontournable.

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi des diagrammes de représentation tels que celui de Schoeller-Berkalof et Piper, afin de mieux cerner les particularités des eaux étudiées.

IV.2.3.1. Classification des eaux d'après PIPER

La représentation des analyses sur le diagramme de Piper montre une variation des faciès chimiques des eaux de la nappe de l'Albien, et qui se subdivisent en deux groupes (Fig.IV.8).

- Groupe des carbonatés : représenté par un faciès bicarbonaté calcique et magnésien, les points qui caractérisent ce groupe se situés au sud de la plaine, ce qui confirme que les apports des ces deux éléments est la dissolution des et le calcaire-dolomitiques du crétacé supérieur qui affleurent dans la bordure sud de la nappe aquifère (calcaire du turonien d'Oukat el Gharbi et Chargui).
- Groupe des salifère : présente un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien, et caractérise la quasi-totalité des eaux souterraine de l'Albien.
Ceci est probablement à essévage des lentilles gypsifères, ou à l'effet de l'évaporation dans zones où le niveau statique de la nappe aquifère est peu profond.

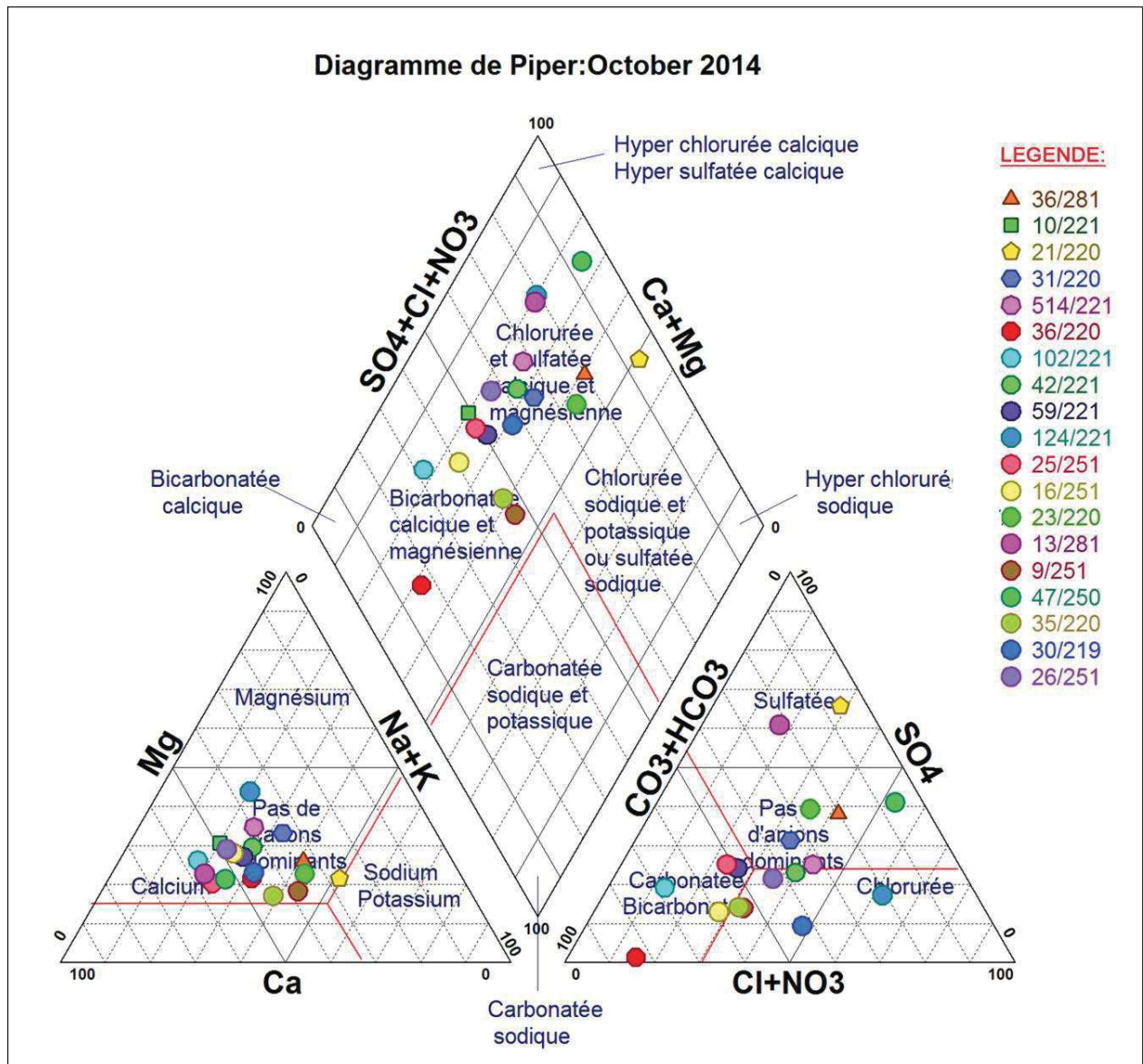


Fig.IV.8: Classification des eaux de la nappe d'Ain Oussera selon piper. Octobre 2014.

IV.2.3.2. Classification des eaux d'après Schoeller-Berkaloff

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

Les deux digrammes de Schoeller-Berkaloff tracés pour les points des eaux analysés, permet de déterminer les grandes familles chimiques suivantes :

- Domination des ions de calcium (Ca^{++}) pour les cations pour la plupart des eaux de la nappe de l'Albien.
- Domination des ions des bicarbonates (HCO_3^-).
- Le faciès dominant est le Bicarbonaté Calcique.

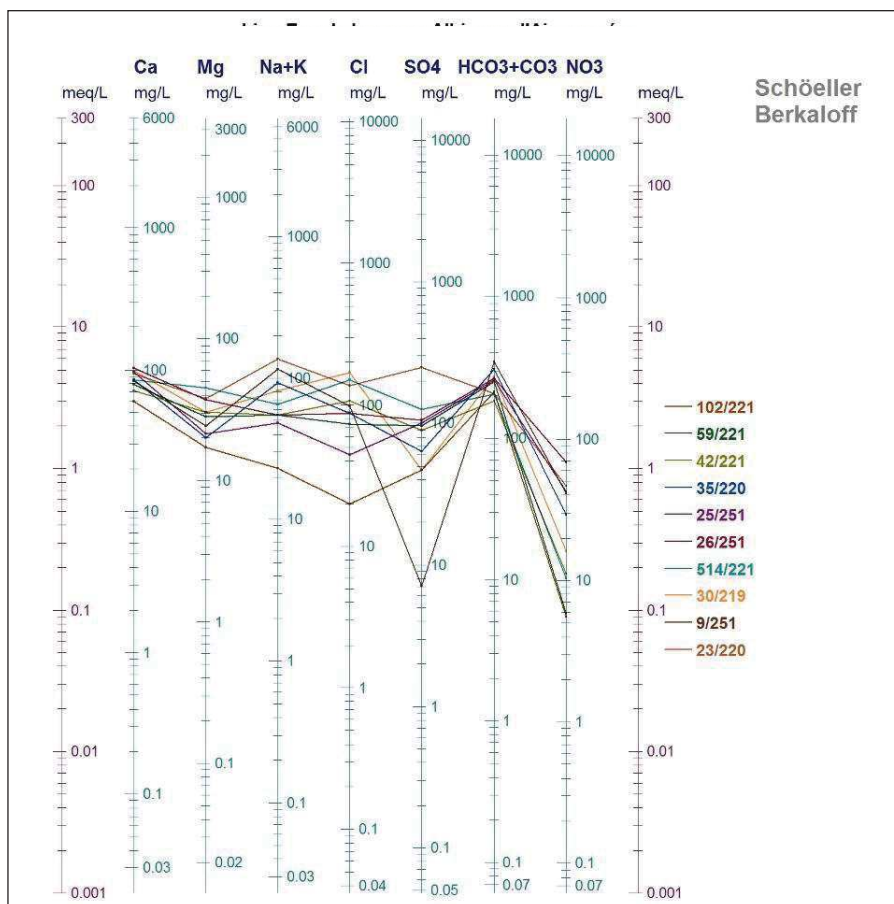


Fig.IV.9: Classification des eaux de la nappe d'Ain Oussera selon Schoeller-Berkaloff
Octobre 2014

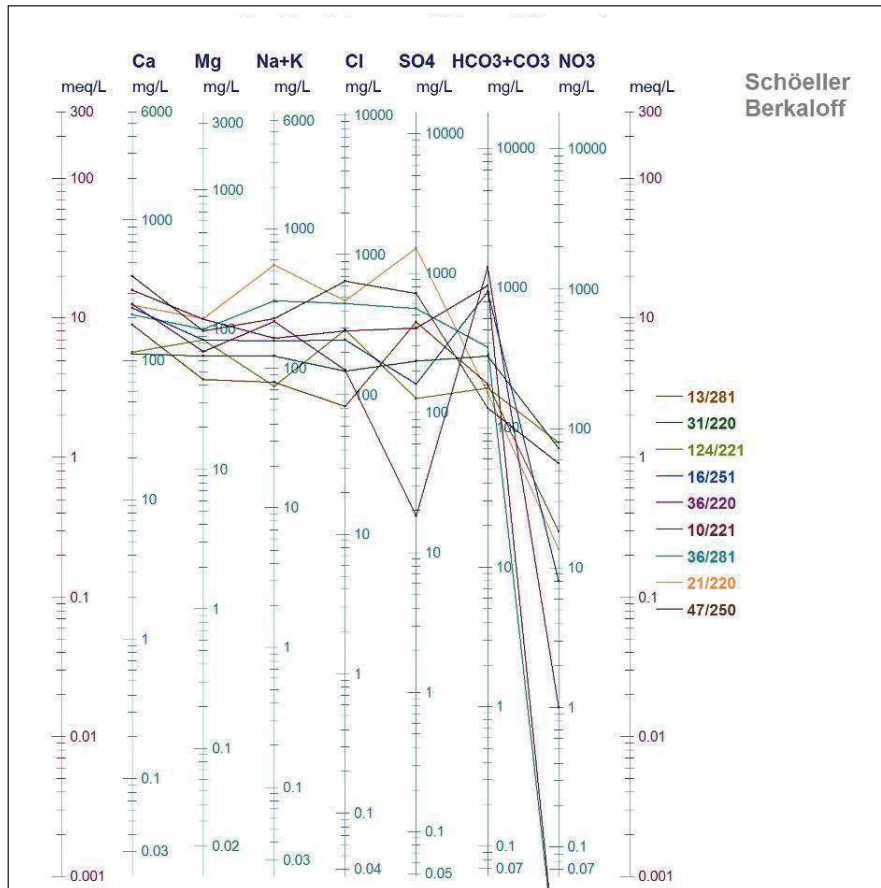


Fig.IV.10: Classification des eaux de la nappe d'Ain Oussera selon Schoeller-Berkaloff Octobre 2014

IV.2.4. Aptitude des eaux à la potabilité

Afin de définir la potabilité des eaux souterraines, nous allons baser sur les normes qui ont été établies par l'organisation mondiale de la santé.

Ces normes définissent deux types de concentrations maximales (Tableau IV.4) qui traduisent les limites de potabilité. On distingue :

- Une concentration maximale acceptable à partir de laquelle une eau provoque une certaine réticence chez les consommateurs
- Une concentration maximale admissible qui correspond à la quantité maximale de substance à tolérer et dont la teneur supérieure peut être dangereuse à la santé.

Tableau IV.4 : Normes de potabilité de l'O.M.S.

Eléments chimiques	Concentration maximale acceptable (mg/l)	Concentration maximale admissible (mg/l)	Pourcentage des échantillons ayant une concentration inférieure à la concentration maximale admissible
Calcium	75	200	68.41 %
Magnésium	50	150	100 %
Sodium	150	200	84.21 %
Potassium	10	12	63.15
Sulfates	200	400	73.68 %
Chlorures	200	400	84.21 %
Nitrates	50	50	73.68 %
TDS	500	1000	63.15 %

L'examen du tableau IV.4, montre que la comparaison des résultats des analyses physico-chimiques des eaux de la plaine d'Ain Oussera aux normes l'O.M.S, la majorité des points d'eaux donne des valeurs admissibles. Ce qui nous permet de dire que les eaux de la plaine d'Ain Oussera sont généralement de bonne qualité chimique.

IV.2.5. Aptitudes des eaux à l'irrigation

L'eau destinée pour l'irrigation, riche en sodium et pauvre en calcium, s'appauvrira en sodium par échange ionique au contact d'un sol argileux. La concentration en sodium de l'argile augmentera jusqu'à saturation. Cette saturation du milieu argileux peut avoir une incidence négative sur la stabilité du sol (Banton, 1999).

L'abondance de sodium dans l'eau d'irrigation peut provoquer également la dispersion et la destruction de la structure du sol, si la teneur en sodium est au moins trois fois supérieure à celle du calcium, dans de telles conditions, il peut devenir extrêmement difficile à satisfaire les besoins en eau de la culture. Le risque est déterminé à partir de la valeur du sodium absorbable « Sodium Absorption Ratio » (S.A.R) pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé. Le S.A.R est donné par la formule ci-dessous, il est utilisé en combinaisons avec la conductivité électrique de l'eau.

Plusieurs classifications ont été proposées pour classer les eaux par rapport à leur qualité pour l'irrigation. La plupart de ces classifications se basent sur le calcul de deux facteurs essentiels, à savoir la salinité présentée par la conductivité électrique et le SAR est calculé par la formule de Gapon (1933) comme suit :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}} \quad \text{où tous les éléments sont exprimés en méq/l}$$

L'eau avec un SAR se situant entre 0 et 6 peut généralement être utilisée sur tout type de sol avec une faible accumulation de sodium. Quand le SAR se situe entre 6 et 9, les risques de problèmes liés avec la perméabilité du sol augmentent. Dans ce cas, le sol devrait être échantillonné tous les 1 ou 2 ans pour déterminer si l'eau augmente la teneur en sodium du sol (Gouaidia, 2008).

Pour classer ces eaux, nous avons utilisé la méthode de Richards. Le Tableau IV.5 récapitule les résultats obtenus après l'interprétation du diagramme de Richards (Fig.IV.10).

Tableau IV.5: Résultats obtenus après interprétation du diagramme de Richards

Classes		Pourcentage des points d'eau (%)
Admissible	S ₁ C ₃	57.89 %
	S ₁ C ₂	5.26 %
Médiocre	S ₁ C ₄	31.57 %
	S ₂ C ₄	5.26 %
Mauvaise	S ₂ C ₄	00
Très mauvaise	S ₃ C ₄	00

En générale les eaux de la nappe de la plaine d'Ain Oussera sont admissibles à médiocres, pouvant utilisées à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.

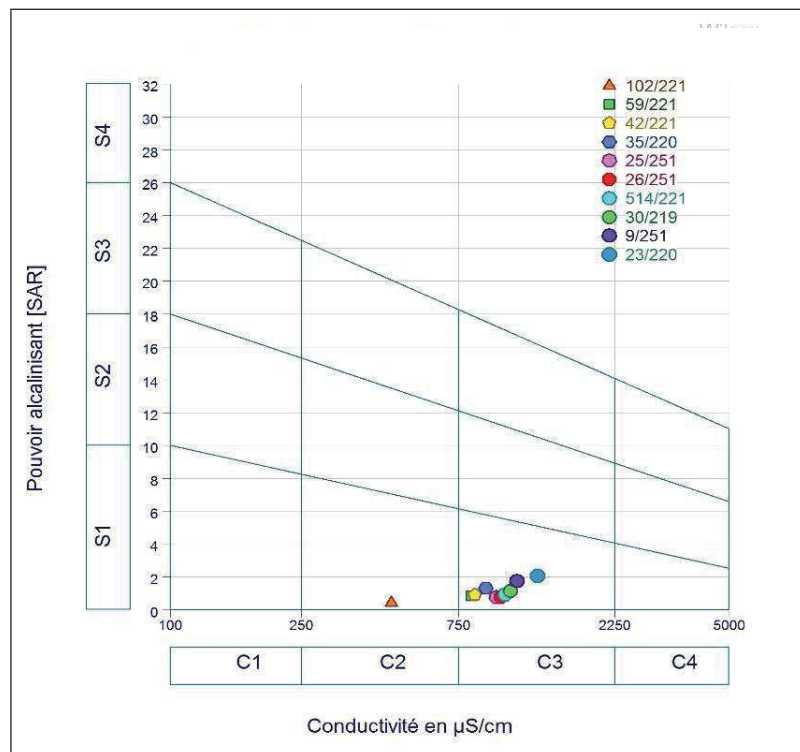
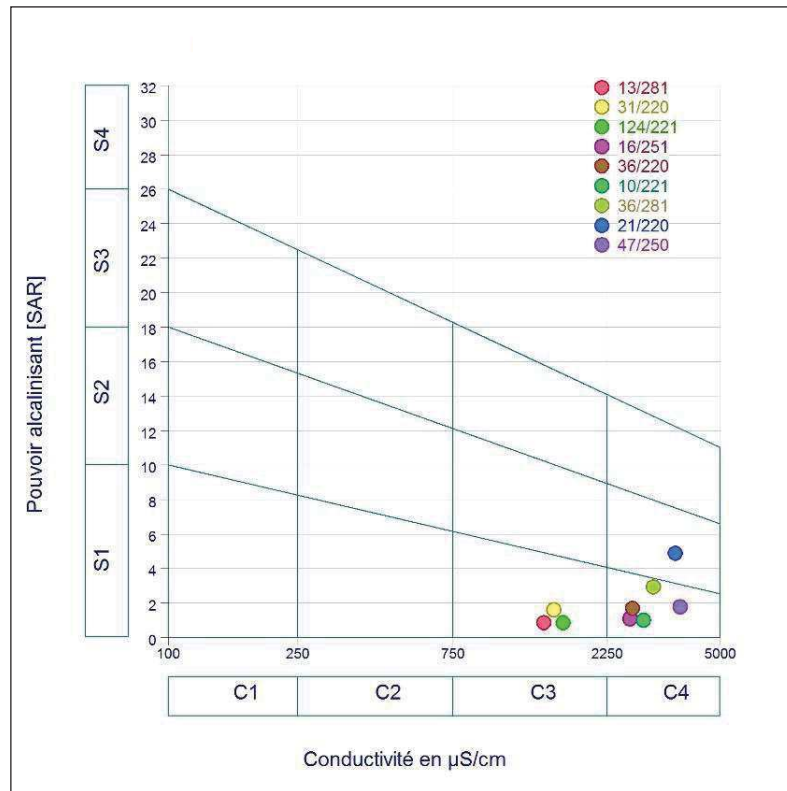


Fig.IV.11 : Diagramme de Richards: classification des eaux d'irrigation en fonction du S.A.R

IV.3. Caractérisation géochimique

Ce partie décrit les principales caractéristiques géochimique des eaux, ainsi que de mettre en évidence et de comprendre les diverses causes de salinisation de leurs eaux.

Tableau IV.6: Caractéristiques géochimiques des sources de salinité (Vengosh, 2003)

Source	TDS (g/L)	Na/Cl (rapport molaire)	SO ₄ /Cl (10 ⁻³)	Br/Cl rapport molaire (10 ⁻³)	B/Cl rapport molaire (10 ⁻³)	611B(‰)	634S(‰)	35Cl/Cl (10 ⁻¹⁵)
eau de mer	35	0,86	0,05	1,5	0,8	39	21	<5
saumures primaires (résidus d'eau de mer évaporée)	> 35	< 0,86	> 0,05	>1,5	<0,8	>39	>21	<5 à 100
dissolution d'évaporites	> 1	1 (halite)	>> 0,05	<1,5	<0,8	20 à 30	<21	<5
eaux hydrothermales	0,2 à > 1	> 1	>> 0,05	<1,5	>5	0 ± 5	<<21	<5
eaux usées domestiques	≈ 1	> 1	> 0,05	<1,5		5	6 à 10	50 à >100
eaux de retour d'irrigation	0,5 à 5	> 1	>> 0,05	<1,5	>0,8	20 à 30	-	50 à >100

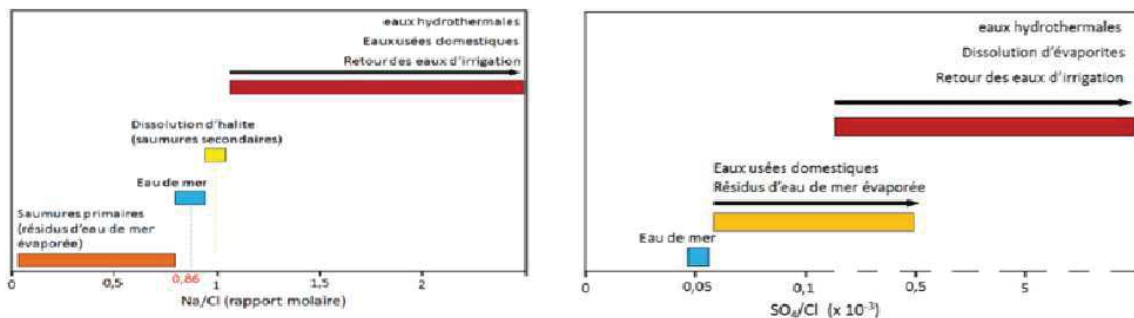


Fig.IV.12 : Rapports molaires Na/Cl, SO₄/Cl, des principales sources de salinité (Vengosh, 2003)

Les eaux de l'Albien ne peuvent être guère considérées comme eaux de solution des sols, bien que la nappe est libre presque dans la totalité du secteur d'étude, et par conséquent on est amené à tester les caractéristiques géochimiques des sources de la salinité des eaux selon Vengosh (2003). En effet, nos résultats, montrent que 10 sur 25 des échantillons présentent une totale charge saline dissoute TDS inférieurs à 1 (TDS (g/l) <1) soit 40% des forages, ce qui suggère que 60% échantillons sont issues, probablement de la dominance de la dissolution des évaporites, et des carbonates, avec une faible influence de la matrice silicatée. En effet, l'indice d'échange de bases est négatif sur 60% des forages. Par ailleurs, les eaux d'irrigation ont un apport marqué, du fait que les nitrates présentent des teneurs au-delà des normes (>50 mg/l).

IV.4. Conclusion

Les eaux de la nappe gréseuse de l'Albien se caractérisent par une minéralisation moyenne, la conductivité varie entre 0.47 ms/cm et 3.76 ms/cm et la les valeurs de la TDS oscillent entre 386 mg/l et 3074 mg/l.

La composition chimique des points d'eaux analysées, montre que les concentrations des ions majeurs reflètent l'environnement géologique. Les eaux carbonatées, représentées par un faciès bicarbonaté calcique et magnésienne, se situés au sud de la plaine, ce qui confirme que les apports de ces deux éléments est la dissolution des calcaire-dolomitiques du crétaé supérieur qui affleurent dans la bordure sud de la nappe aquifère (calcaire du turonien d'Oukat el Gharbi et Chargui). Les eaux salifères présentant un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien, caractérise la quasi-totalité des eaux souterraine de l'Albien, ceci est du probablement à lessivage des lentilles gypsifères, ou à l'effet de l'évaporation dans zones où le niveau statique de la nappe aquifère est peu profond.

Les eaux ont des faciès chimique Chloruré et Sulfaté calcique et magnésien et Bicarbonaté calcique et magnésien.

La comparaison des résultats des analyses physico-chimiques des eaux de la plaine d'Ain Oussera aux normes l'OMS, nous indique que la majorité des points d'eau ont des valeurs admissibles. Donc ces eaux sont généralement de bonne qualité chimique.

Pour l'aptitude des eaux de la nappe d'Ain Oussera à l'irrigation suivant les résultats de calcul la qualité est admissible à médiocre, pouvant utilisées à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés

CHAPITRE V

GESTION INTERGREE DES RESSOURCES EN EAU : LA MODELISATION

V. Introduction

Depuis une vingtaine d'années, les techniques de simulation des écoulements souterrains deviennent très répandues au vu de la prolifération des programmes de calculs informatiques ou logiciels. Cette évolution est due non seulement au développement de moyens de calcul de plus en plus puissants et accessibles, mais aussi à la grande diversification des problèmes hydrogéologiques désormais susceptibles d'être résolus. Trouver de l'eau ne suffit plus, la gestion et la protection de l'eau souterraine deviennent tout aussi importantes surtout dans les zones arides et semi-arides où les ressources renouvelables sont rares (Margat, 2000; Crampon, 2003), or, gérer ces ressources c'est comprendre le fonctionnement de l'aquifère dans les conditions naturelles et prévoir l'influence de l'intervention anthropique sur la quantité et la qualité de l'eau souterraine disponible. Les modèles mathématiques constituent un moyen de la gestion de ces systèmes (Mania, 1978).

La modélisation est de plus en plus utilisée en hydrogéologie pour analyser les écoulements et prédire la réponse des systèmes aux variations de stress (Woldeamlak *et al*, 2007 ; Ertürk *et al*, 2014). Au moyen de ces modèles, toutes les données ponctuelles disponibles sur une zone donnée peuvent être utilisées pour approximer de façon logique et fiable les données manquantes et fournir une réponse globale des tendances de la nappe (Dassargues, 1991). Les modèles représentent de manière simplifiée des systèmes aquifères très souvent complexes (hétérogénéité, anisotropie).

Cette partie d'étude consiste à la réalisation d'un modèle mathématique simulant l'écoulement d'eau souterraines dans l'aquifère des grès de l'Albien inférieur, et permet de calculé les flux aux limites du système de manière spatiale et temporelles et les hauteurs de piézométriques. Cet outil va nous servir à la gestion rationnelle des réserves souterraines de la plaine d'Ain Oussera.

V.1. Généralités sur la modélisation hydrogéologique

V.1.1. Modèles mathématiques en hydrogéologie

Le model mathématique peu être défini comme une représentation simplifiée de la réalité en vue de simuler la réponse d'un système à une série de sollicitation Cette représentation doit cependant être la plus conforme possible du points de vue des mécanismes et processus simulés (Dassargues, 1995).

Au sens général, un modèle est une représentation schématisée de phénomènes (Flipo *et al*, 2003). Plus particulièrement, les modèles de simulation cherchent à reproduire des phénomènes ou à prévoir le comportement d'un système soumis à des sollicitations données. On calcule l'évolution de variables inconnues (les sorties) en fonction des variables connues (les entrées) et des paramètres du système.

Il existe deux types de modèles mathématique, le modèle déterministe et le modèle stochastique ou probabiliste.

- **Le modèle déterministe** : se base sur le principe de causalité liant par une relation unique la cause et les résultats, la nappe aquifère représentée par des caractéristiques recevant une sollicitation extérieur représentée par des variables indépendantes elle réagit d'une seule manière et les variables dépendantes fournissent une mesure de cette réaction. Les paramètres de la nappe sont la porosité et la transmissivité, les variables indépendantes sont représentés par l'infiltration et le pompage et les variables dépendantes sont la pression et la hauteur de la piézométrie (Dassargues, 1991).
- **Le modèle stochastique ou probabiliste** : postule que les paramètres représentant la nappe et variables indépendantes sont des variables aléatoire possèdent des fonctions de probabilité déterminées (Dassargues, 1991). Les résultats de cette méthode peuvent être parfois illusoire car elle suppose que le milieu est parfaitement représenté par les fonctions de probabilité des paramètres et des sollicitations.

Le système déterministe correspond le mieux au type de problème que nous voulons traiter.

V.1.2. Formulations mathématiques de l'écoulement

L'équation qui régit les écoulements d'eau souterraine est obtenue en associant la loi de conservation de masse et la loi de Darcy. Le principe de continuité qui traduit la conservation de la masse de fluide au sein d'un volume demeurant fixe dans l'espace s'écrit (Marsily, 1981, 1994 ; Ledoux, 1989) :

$$\operatorname{div}(\rho v) + \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \rho q = 0 \quad \operatorname{div}(\rho q) + \frac{\partial(\rho n)}{\partial t} + \rho q' = 0$$

La loi de Darcy permet de calculer le flux q d'un fluide à travers 'un milieu poreux. Les causes de l'écoulement sont le gradient de pression et la gravité soit le gradient de charge hydraulique. Selon la loi de Darcy, le débit spécifique (débit par unité de surface) pour un fluide incompressible s'écrit :

$$\vec{q} = -K \overline{\operatorname{grad} h}$$

La charge h est définie par la relation :

$$h = z + \frac{p}{\rho \cdot g}$$

K est la conductivité hydraulique qui dépend du fluide et du milieu :

$$K = \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu}$$

L'équation de diffusivité qui découle de ces deux lois pour une nappe captive s'écrit :

$$\text{div} (K \overrightarrow{\text{grad}} h) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - q'$$

Où

$\rho S_s \frac{\partial h}{\partial t}$: Représente la variation temporelle de la masse du fluide emmagasiné dans un volume élémentaire. Cette équation définit entièrement l'écoulement en permettant de déterminer le champ de charge h.

K : conductivité hydraulique [LT⁻¹]

S_s : coefficient d'emmagasinement spécifique [L⁻¹]

q : débit spécifique de l'écoulement à travers le milieu poreux ou vitesse de Darcy [LT⁻¹]

q' : somme algébrique des débits prélevés et apportés par unité de volume [T⁻¹]

k : perméabilité intrinsèque du milieu poreux [L²]

h : charge hydraulique [L]

t : temps [T]

n : porosité du milieu [-]

μ : viscosité dynamique [ML⁻¹T⁻¹]

ρ : masse volumique du fluide [ML⁻³]

p : pression du fluide [ML⁻¹T⁻²],

g : accélération de la pesanteur [LT⁻²]

z : altitude [L]

V.1.3. Méthodes de résolution de l'équation de diffusivité

Les équations hydrodynamiques en milieu souterrain sont des équations différentielles fortement non linéaires que l'on ne peut pas résoudre avec les moyens analytiques habituels. Pour cela on utilise des méthodes numériques telles que les différences finies et les éléments finis sont celles couramment utilisées dans la résolution de l'équation de diffusivité (Wang, 1982 ; Pinder & Celia, 2006). Le choix de l'une ou l'autre de ces méthodes dépend en général du problème à résoudre mais aussi de la préférence de l'utilisateur. La méthode des différences finies est souvent préférée à celle des éléments finis pour sa simplicité.

➤ **Les différences finies** : cette méthode est facile à programmer et convient à la résolution de problèmes régionaux d'écoulement des nappes (Gaaloul, 2001 ; Abourida, 2002 ; Hani, 2004 ; Baba-Hamed, 2007 ; Derouane, 2006 ; Lautz, 2006). En pratique, elle se limite à des mailles

simples et représente les hétérogénéités du milieu dans des directions parallèles aux côtés des mailles.

➤ **Les éléments finis** : c'est une méthode difficile à programmer, à utiliser et qui demande davantage de temps à l'ordinateur pour effectuer les calculs. La forme des mailles n'est pas limitée, ce qui permet de traiter toutes les directions d'hétérogénéités du milieu (Neuman & Witherspoon, 1974 ; El Mansouri et al, 1991). Elle est efficace dans les problèmes locaux de génie-civil.

C'est un modèle à base physique, déterministe, capable de représenter 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. Pour ce faire l'aquifère doit être discrétisé en mailles quadrangulaires et des conditions aux limites doivent être imposées. Le nombre et la taille des mailles dépendent de la précision attendue et de la nature des données sources (nombre, distribution, qualité) (Sylvain, 2001).

V.1.4. Conditions initiales et conditions aux limites

➤ **La condition initiale** : consiste à connaître la distribution du potentiel hydraulique en tout point du domaine au temps initial

➤ **Les conditions aux limites** : concernent les règles d'échange des flux entre le domaine modélisé et le milieu extérieur (flux d'eau, flux de matière migrant avec l'eau, ou flux de chaleur).

Les limites du domaine d'étude doivent coïncider avec des limites physiques où la description des flux puisse être effectuée de manière conceptuelle à partir des observations sur le terrain. La description de ces conditions fait partie de la définition de la structure du modèle et en conditionne par conséquent fortement la validité car c'est effectivement à travers les limites que s'établit le bilan d'un aquifère. Les principaux types de conditions aux limites) sont les suivants :

- limite à potentiel imposé (condition de Dirichlet)
- limite à flux imposé (condition de Neumann)
- condition de Fourier (condition de Cauchy)

a- limite à potentiel imposé

Une limite est dite à potentiel imposé, si le long de cette limite, la charge hydraulique est indépendante des conditions de circulation de la nappe. Cette charge peut varier dans l'espace et dans le temps. Dans la réalité, ces limites sont matérialisées par des plans d'eau, des lacs, des canaux ou des rivières en communication avec des nappes.

b- limite à flux imposé

Une limite est dite à flux imposé, si le long de cette limite le débit par unité de surface est constant et connu.

On aura une limite à flux nul si limites sont représentées lorsque un aquifère est en contact avec des formations imperméables. Une limite est dite à flux imposé non nul si ces limites sont matérialisées par les limites du domaine ou par les ouvrages de captage.

c- condition de Fourier

Cette condition se présente lorsqu'une rivière dont le fond est colmatée et est en communication (drainage ou alimentation) avec une nappe libre.

V.2. Présentation du logiciel de modélisation

V.2.1 Code choisi

La réponse dynamique du système aquifère aux diverses sollicitations, auxquelles il est soumis, ne peut être analysée de manière appropriée qu'à travers la modélisation (Bredehoeft, 2002 ; Dong et al, 2012). Le modèle de MODFLOW est développé en Fortran et permet la résolution numérique de l'équation de diffusivité par la méthode des différences finies. Il a été choisi pour simuler le système d'écoulement des eaux souterraines 2-D et 3-D de la couche aquifère de la plaine d'Ain Oussera. Il a été développé par (McDonald & Harbaugh, 1988 ; Harbaugh et al, 2000). Ce modèle est bien documenté et intensivement utilisé partout dans le monde, et permet de simuler les écoulements et le transport de contaminants réactifs en milieu souterrain en régime permanent ou transitoire, basés sur la discrétisation horizontale et verticale du domaine modelant qui résout l'équation d'écoulement d'eaux souterraines pour chaque cellule. La version visuelle 4.6 de MODFLOW a été adoptée pour simuler l'écoulement instable d'eaux souterraines dans cette étude (Azlaoui et al, 2017). Le VISUAL MODFLOW intègre plusieurs modules :

- MODFLOW-2000 : développé par USGS(Palok.1989) pour simuler les écoulements souterrains.
- MODPATH : Ce programme est utilisé pour simuler les lignes d'écoulement de particules à l'aval ou à l'amont d'un point de référence.
- MT3D : Ce programme modélise le transport des solutions ou les contaminants dans la nappe aquifère.

Le code MODFLOW 2000 résout l'équation de diffusivité aux dérivées partielles de l'écoulement des eaux souterraines en milieu poreux par la méthode des différences finies

En régime permanent, la norme et la direction de l'écoulement sont constantes dans le temps en tout point du milieu. L'équation de diffusivité s'écrit :

$$K_{xx} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_{yy} \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_{zz} \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + q' = 0$$

En régime transitoire, la charge hydraulique varie en fonction du temps et l'équation de diffusivité s'écrit :

$$K_{xx} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_{yy} \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_{zz} \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - q'$$

K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} : conductivité hydraulique suivant les directions principales d'anisotropie du milieu (X, Y et Z) de l'espace [LT^{-1}]

S_s : coefficient d'emménagement spécifique [L^{-1}]

q' : somme algébrique des débits prélevés et apportés [T^{-1}]

h : charge hydraulique [L]

V.2.2. Logiciel adapté aux objectifs de l'étude

Dans le cadre de l'étude de modélisation de la plaine d'Ain Oussera, 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.

V.2.3. Une bonne adaptation au contexte hydrogéologique

Le VISUAL MODFLOW permet de représenter des systèmes hydrogéologiques complexes à partir d'une interface graphique qui facilite l'intégration des données :

- 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

V.2.4. 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.

VISUAL 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.

VISUAL 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 permet de créer et simuler des modèles facilement et 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. Il est possible également d'exporter les résultats sous format graphique ou SURFER ou DXF ou HPGL et BMP.

V.2.5. Méthodologie suivie pour la construction du modèle

La méthodologie de la construction du modèle est basée sur les étapes suivantes (Fig.V.1) :

- Identification des objectifs principaux aux quels doit répondre le modèle.
- Collection et analyse des données disponibles.
- Construction du model conceptuel.
- Implémentation du model conceptuel dans un programme numérique choisi
- (discrétisation du domaine, introduire le données de sollicitation et les conditions aux limites).
- Calibration ou le calage du modèle : C'est l'ajustement des paramètres de manière que les résultats calculés soient similaires aux données mesurées pour les mêmes sollicitations du système
- Simulation des scénarios

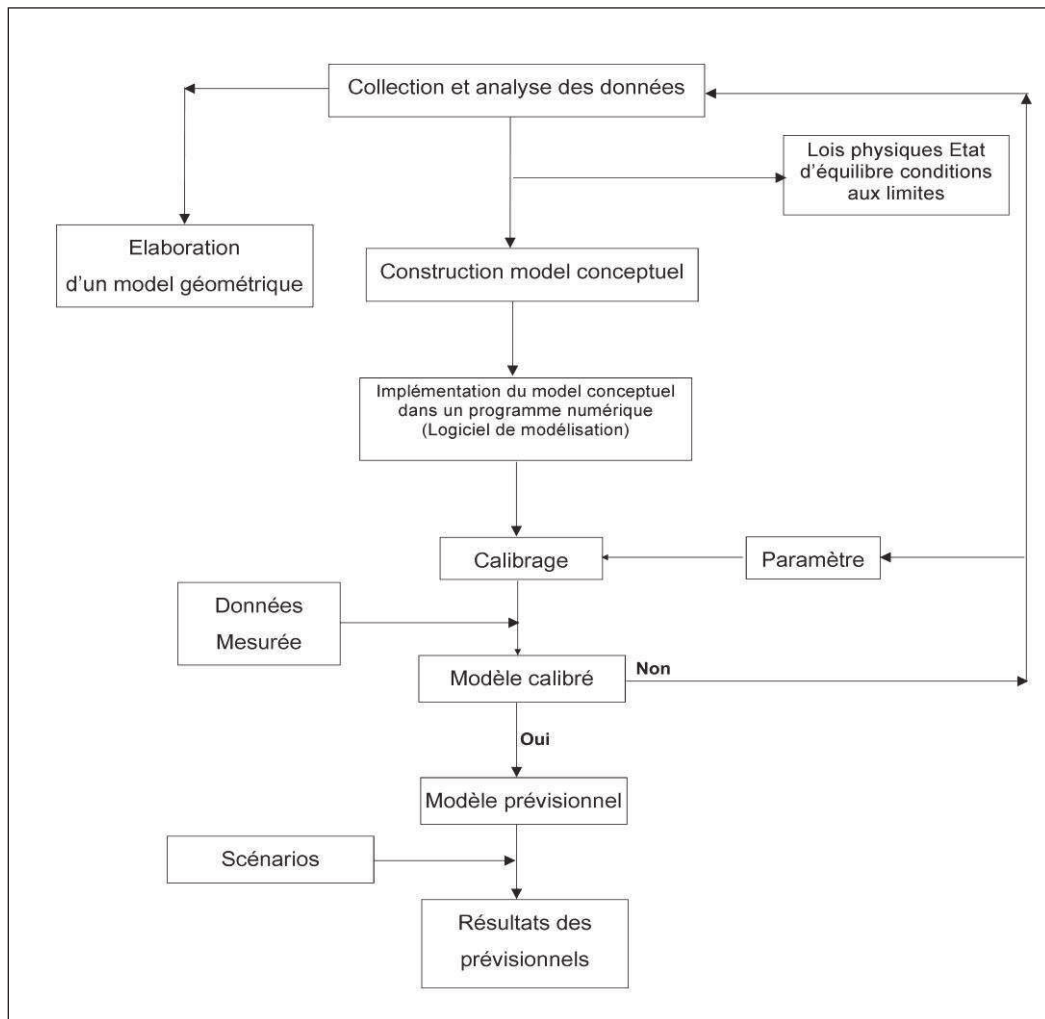


Fig.V.1: Schéma des étapes de développement d'un modèle numérique en Hydrogéologie (Dassargues, 1995)

V.3. Modèles conceptuel et numérique

V.3.1. Model conceptuel

Un model conceptuel est une représentation simplifiée des différentes unités géologiques et hydrogéologiques d'un système aquifère. Il se présente sous la forme de bloc diagramme ou coupe géologique. La nature de ce model va déterminer la dimension et la forme de la grille du modèle hydrodynamique.

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 et géométrie 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.
- Maillage

Le modèle conceptuel recommandé pour le système aquifère de la plaine d'Ain Oussera va prendre en compte l'infiltration des précipitations et les écoulements en zone saturée. Les échanges entre la nappe et les cours d'eau sont très peu développés.

V.3.2. Délimitation de l'extension de la zone d'étude

Domaine modélisé correspond à la limite géologique de l'aquifère des grès de l'Albien inférieur de la plaine d'Ain Oussera. Il couvre une superficie de 3795km², dont les points extrêmes en coordonnées Lambert Nord Algérie sont (Fig.V.2):

X1 : 466 895.83 m

X2 : 565 996.57 m

Y1 : 180 001.47 m

Y2 : 264 696.09 m.

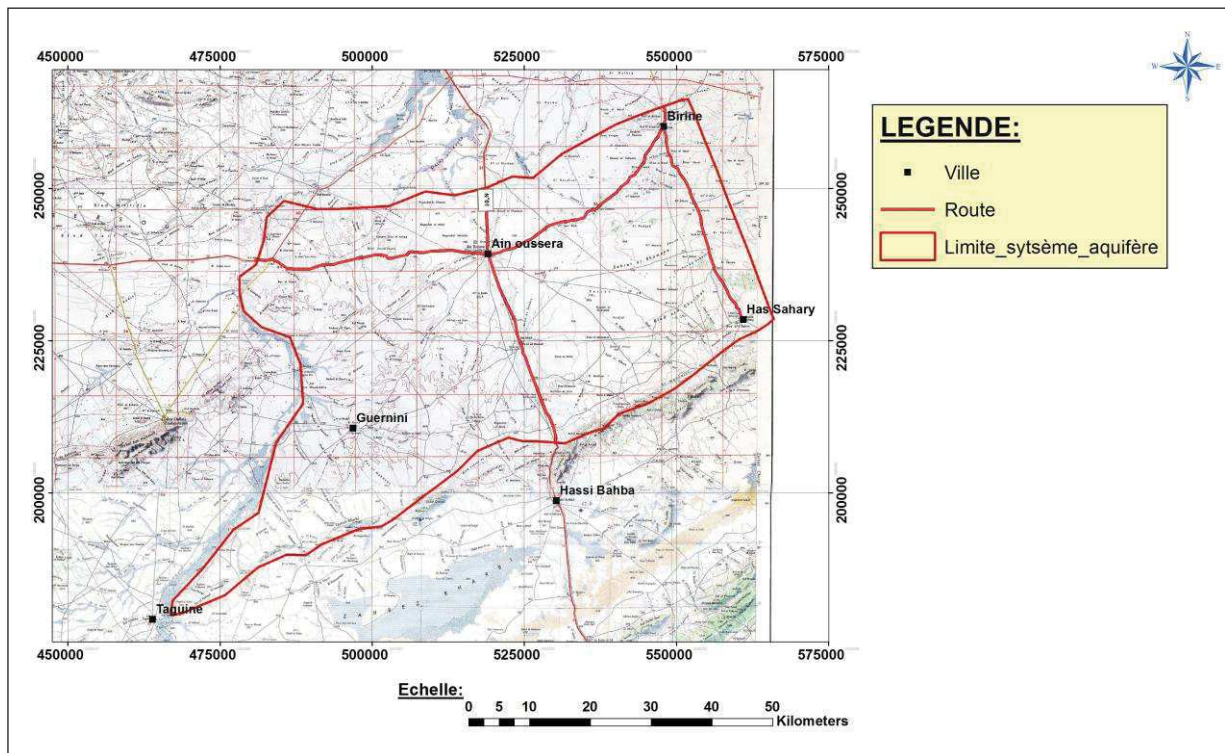


Fig.V.2 : Extension de la zone modélisée

V.3.3. Donnée géologique

La géologie de la nappe d'Ain Oussera a été élaborée à partir des études antérieures et les coupes géologiques des forages réalisés, Parmi ces études nous citons ; l'étude Caratini (1970) et A.ayd (1983). Ces données nous ont permis de faire une description détaillée de la géologie de la région et l'identification des différents aquifères existants (La description détaillée est abordée en partie 01 de l'étude).

V.3.4. Géométrie du modèle

La nappe aquifère de l'Albien est considérée comme nappe libre. Les valeurs des côtes du toit de l'aquifère Albien correspondent à la surface topographique.

La carte du toit du substratum est élaborée à partir des données des coupes géoélectriques et les coupes géologiques des forages réalisés

V.3.4.1. Extension verticale du système aquifère

L'étude hydrogéologique a mis en évidence que la nappe aquifère de l'Albien inférieur constitue la principale source en eau dans la région d'étude. Elle est constituée par des grès à ciment carbonaté. Ces formations affleurent en surface sur la majorité de la plaine. L'extension verticale de ce système aquifère va de la surface topographique jusqu'au toit des formations marneuses de l'Aptien.

- **Toit :** La carte topographique de la zone d'étude a été réalisée à partir du modèle numérique de terrain (MNT). Ces modèles sont mis gratuitement à la disposition du public, <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp> Dans notre étude nous avons utilisé le SRTM1 avec une résolution d'environ 30 m. Les valeurs obtenues nous permettront d'attribuer à chaque maille du modèle une altitude de toit conforme à la réalité (Fig.V.4).

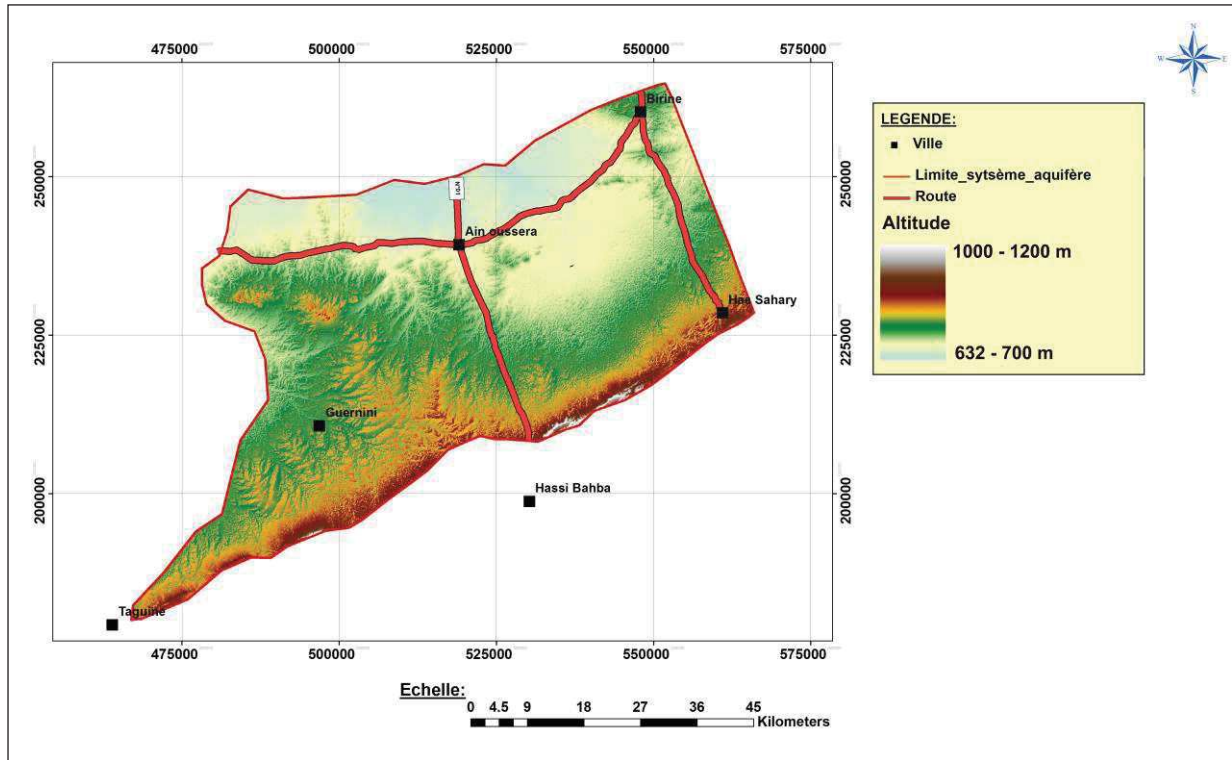


Fig.V.4 : Modèle Numérique de Terrain de la zone modélisée (MNT)

- **Le toit du substratum** : le substratum du système aquifère de l’Albien est constitué par les marnes de l’Aptien. La carte du toit du substratum a été élaborée à partir des données des coupes géoélectriques et les coupes géologiques des forages réalisés (Fig.V.5).La côte du toit de l’Aptien oscille entre 1010 m et 419m.
- **L’Epaisseur de l’aquifère de l’Albien** : une carte isopache a été établie à partir des coupes lithostratigraphiques des forages réalisés, ainsi que les coupes géoélectriques. Elle nous a permis de visualiser la structure du réservoir de la nappe d’eau de l’Albien inférieur (Fig.V.6).

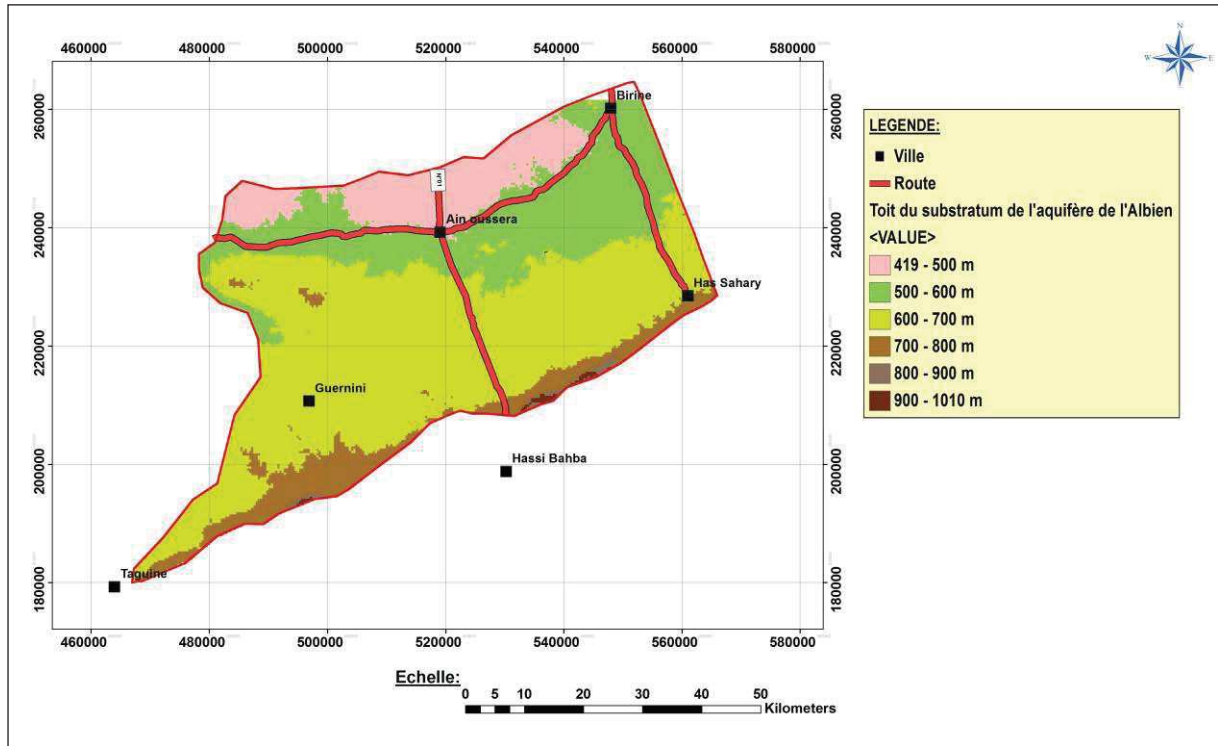


Fig.V.5: Carte de Toit du substratum de la zone modélisée

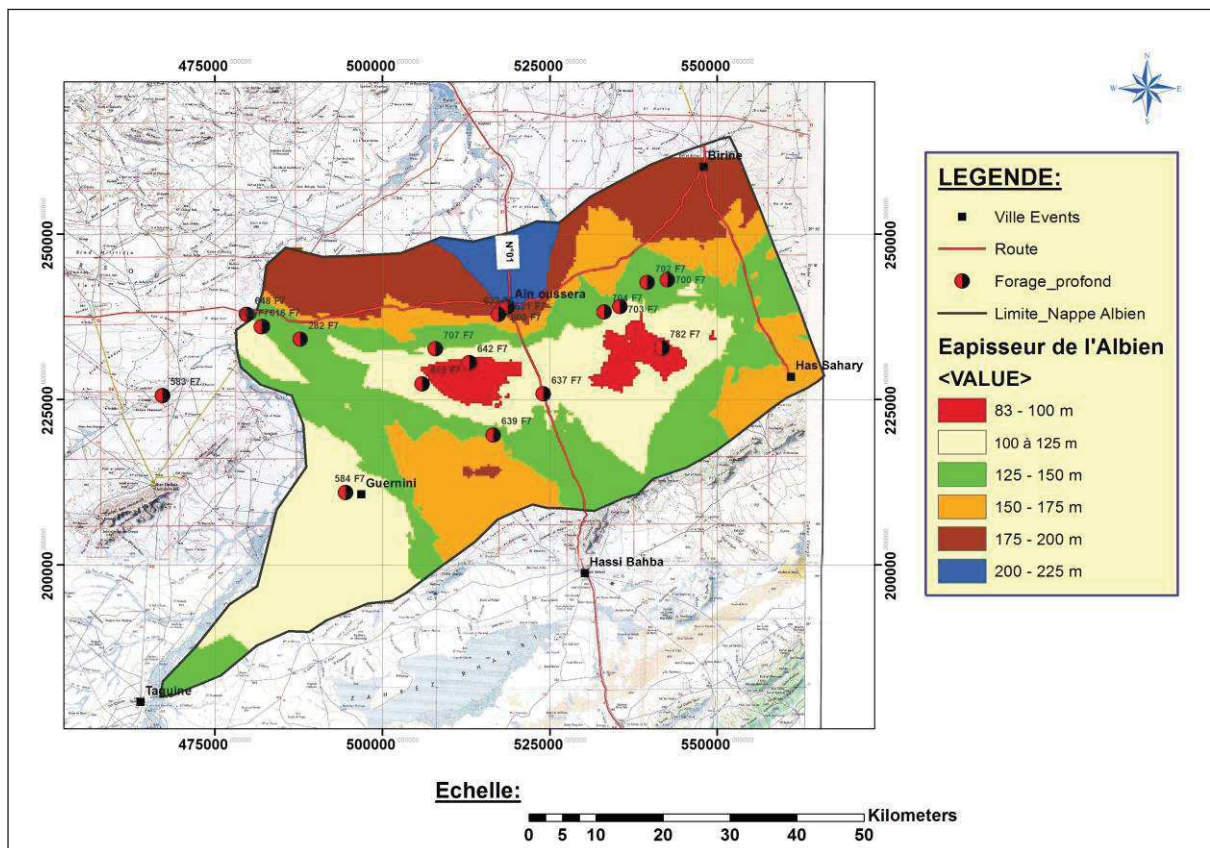


Fig.V.6: Carte d'égal épaisseur de l'Albien inférieur

V.3.4.2. Extension Horizontale

La synthèse géologique et géophysique a permis de déterminer l'extension horizontale de l'aquifère de l'Albien (Fig.V.1) :

- Au Nord, la limite du système a été déplacée au-delà de l'axe de l'anticlinale Doghmane. Dans cette partie nord de la plaine, les terrains de l'Albien et les terrains sus-jacents du Cénomaniens, du Turonien et du Coniacien sont en continuité hydraulique.
- Au sud, la limite est constituée par les affleurements des grès de l'albien (Rouss Sbaa).
- A l'Est, la limite est déterminée par le changement des faciès géologique, les formations aquifère de l'Albien deviennent moins perméables (au-delà de la route reliant la ville de Birine - Had Sahary).
- A l'ouest, la limite est constituée par Oued Touil.

V.3.5. Donnée climatologique

Les données de la climatologie (précipitation et température) sont recueillies du service climatologique de l'ANRH. Une analyse des paramètres climatiques et un bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite a été effectué pour la zone d'étude qui a permis d'estimer l'évapotranspiration, l'infiltration et la lame d'eau totale écoulee. Les valeurs calculées sont mentionnées au tableau ci-dessous :

Tableau.V.1 : Paramètres du Bilan hydraulique de la zone d'étude

P moy annuelle (mm)	ETR (mm)	Ruissellement (mm)	Infiltration (mm)
226.15	210.38	4.34	11.43
	93.02%	1.92%	5.05%

V.3.6. Chroniques piézométriques

Les chroniques piézométriques sont disponibles de 1985 à 2014 pour l'ensemble du réseau piézométrique suivi par l'ANRH de Djelfa, soit 61 piézomètres. 32 points de mesures peuvent être exploités dans le cadre de cette étude (Fig.V.7). L'ensemble de ces piézomètres est implantés dans l'Albien. Les cartes piézométriques utilisées dans l'étude sont :

Notre carte piézométrique est réalisée à partir des données de la campagne piézométrique que nous avons effectuée en 2014. Nous avons fait appel à la carte piézométrique réalisée en 1985 par A. Ayad (Etude hydrogéologique de la plaine d'Ain Oussera), qui nous a servi à caler le modèle en régime permanent.

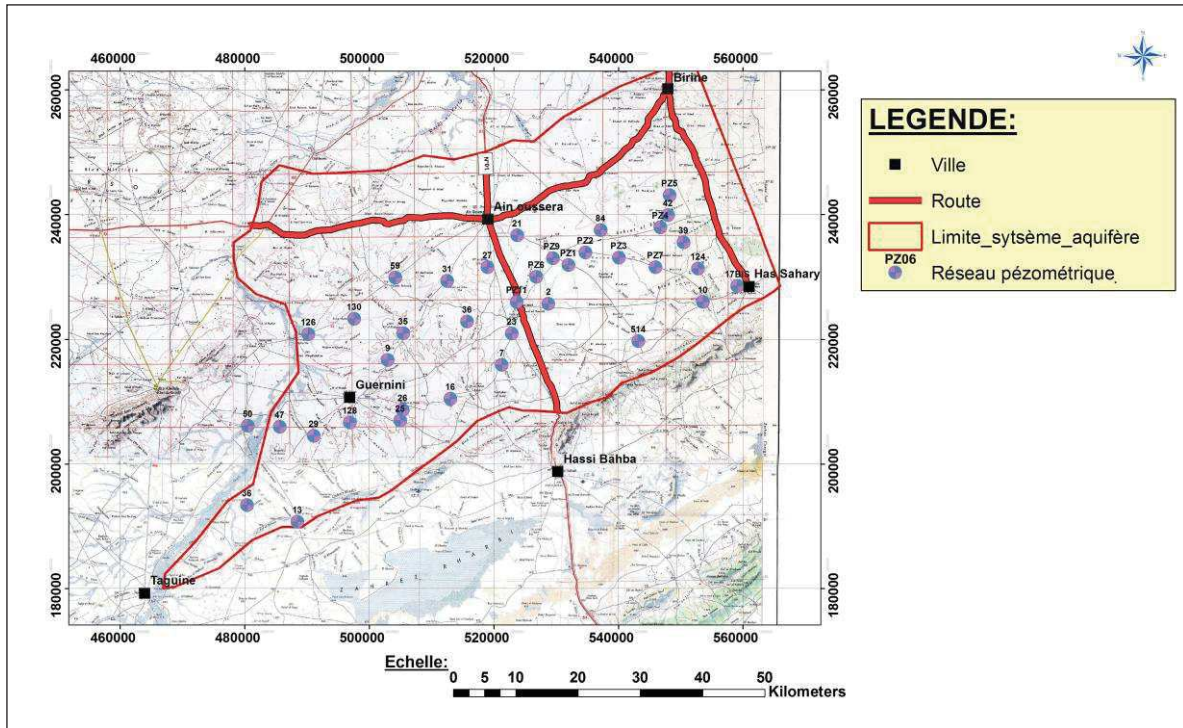


Fig.V.7: Carte de réseau piézométrique de la plaine d'Ain Oussera

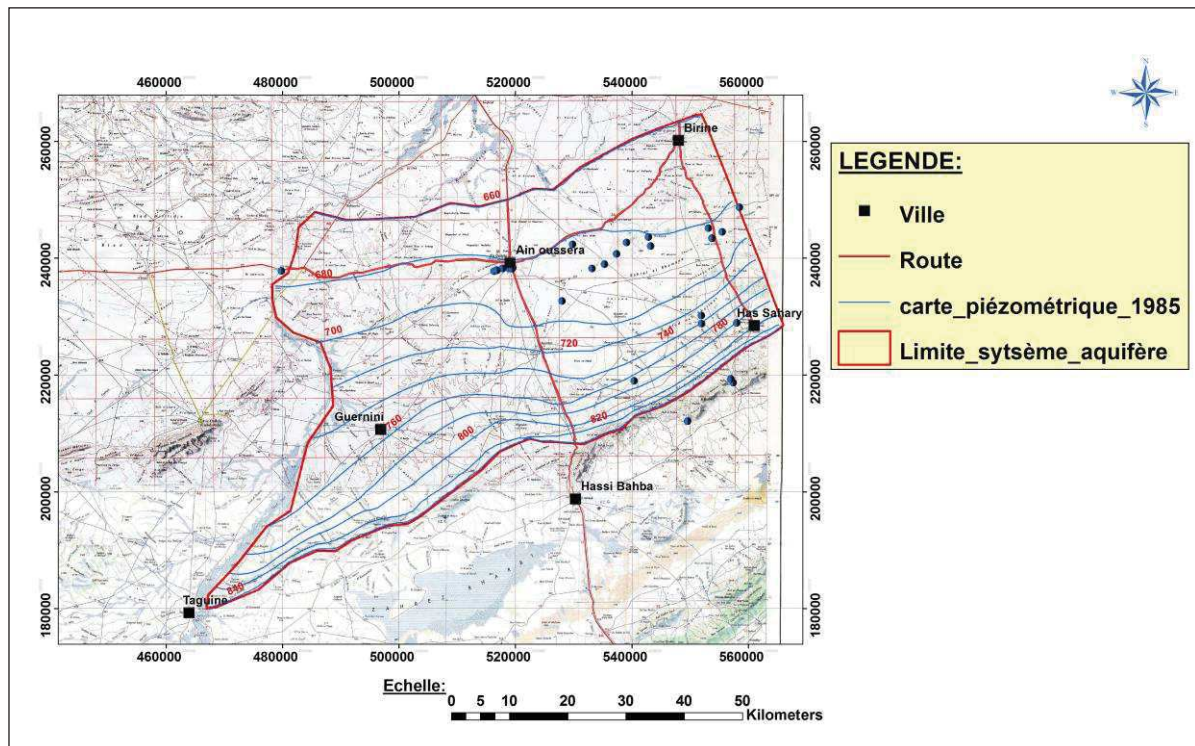


Fig.V.8: Carte piézométrique de l'aquifère de l'Albien d'Ain Oussera (A.Ayad, 1985)

V.3.7. Paramètre hydrodynamique

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 paramètres hydrodynamiques sont obtenus à partir des analyses des données des essais de pompages effectuées dans les forages réalisés dans la zone d'étude. Les valeurs de la perméabilité varient entre $0,1 \cdot 10^{-5}$ m/s et $4,3 \cdot 10^{-4}$ m/s et le coefficient d'emménagement oscille entre $0,93 \cdot 10^{-3}$ et $1,3 \cdot 10^{-3}$.

V.3.8. Discrétisation spatial des conditions aux limites

Les conditions aux limites concernent les règles d'échange des flux entre le domaine modélisé et le milieu extérieur (Ledoux, 2003). Les conditions adoptées pour la conception du modèle sont (Fig.V.10):

V.3.8.1. Condition aux frontières (conditions de Dirichlet)

La carte piézométrique élaborée à partir des données collectées a permis de fixer des conditions du potentiel imposé. Ces limites sont définies en bordure Nord et Sud du modèle par des lignes de mailles à potentiel imposé. Ces valeurs ont été déterminées d'après la carte piézométrique de 1985. Les valeurs sont introduites au centre des mailles :

- Une ligne de potentiel de 840 m a été imposée à la limite sud du modèle.
- Une ligne de potentiel de 660 m a été imposée à la limite Nord du modèle.

V.3.8.2. Condition de flux (condition de Neumann)

- Limite à flux imposé : constitue les débits pompés et les débits rentrant à la nappe aquifère par l'infiltration efficace (réalimentation de la nappe aquifère).
- Limite à flux nul : est caractérisée la limite imperméable ou le flux normal à la limite est nul.

La recharge est introduite dans le modèle sous la forme d'un débit surfacique imposé (mm/an), celui correspondant à une part de la pluviométrie enregistrée sur la zone d'étude.

La recharge est appliquée de manière uniforme sur l'ensemble des mailles de la zone modélisée. Les valeurs de recharge sont introduites dans le Visual Modflow, sur la base de polygones aux quels sont effectués des débits surfaciques imposés (mm/an), Elles sont déterminées par le bilan de Thornthwaite et sont de 5.05 % soit 11.43 mm/an.

La limite Est ne coïncide pas avec une limite d'extension de l'Albien, mais avec une baisse de productivité marquée de l'aquifère, liée à un changement de faciès. Cette limite sera dans un premier temps considérée comme une limite imperméable (condition de flux nul). En effet, les différences de perméabilité entre ces deux faciès sont telles que les échanges latéraux sont limités et probablement négligeables par rapport aux autres termes du bilan. Donc La limite Est considérée comme une limite à flux nul (Limite imperméable).

V.3.8.3. Condition mixtes de potentiel et de flux (Condition de Cauchy)

➤ Condition de rivière

L'observation de la carte piézométrique montre l'existence d'une convergence des sens d'écoulement de la nappe vers l'Oued Touil dans la partie Sud-Ouest de la zone, par contre au Nord-Ouest les courbe isopièzes montrent un gradient d'Oued vers la nappe aquifère.

Oued Touil est représenté par des conditions de flux mixte de potentiel et de flux (condition de Cauchy) qui permettent de quantifier les échanges nappe –rivière.

Compte tenu de l'absence de données de jaugeage, les charges imposées sur l'Oued seront prises comme constantes sur la période de calage et seront estimées à partir de la topographie et de la carte piézométrique 1985.

Le manque des données hydrométrique sur le site, ne nous permet pas de calculer le débit échangé et nous avons choisi de représenter Oued Touil en tant que limite de potentiel. Le logiciel de modélisation MODFLOW à l'aide de module River Package, simule les flux d'échanges entre rivière-nappe aquifère de manière suivante (Fig.V.9):

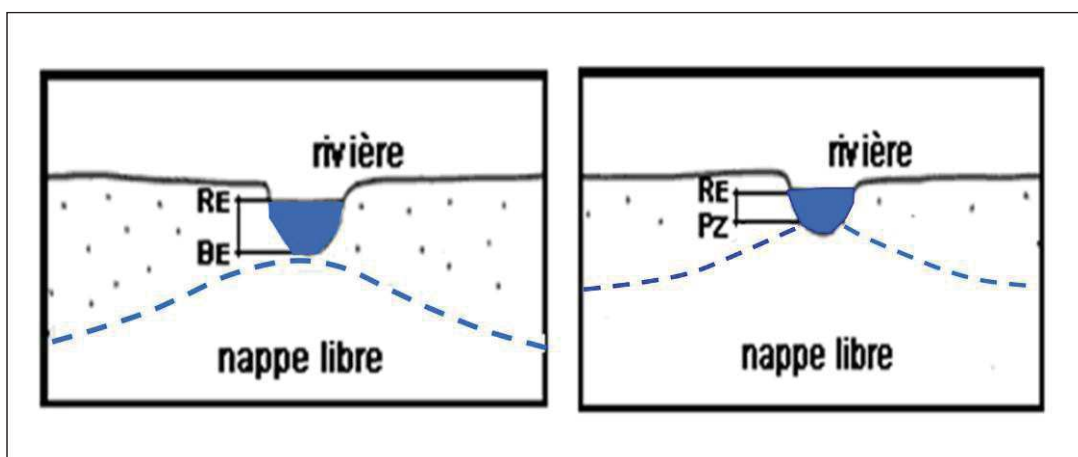


Fig.V.9: Calcul des débite d'échange rivière-nappe selon Modflow

Les flux échangés entre la nappe et la rivière dépendent de la hauteur d'eau dans la rivière et du niveau d'eau de la nappe. Pour le cas où la nappe est déconnectée de la rivière, la rivière alimente la nappe et le flux échangé dépend de la hauteur d'eau dans la rivière. Si la nappe est en contact avec la rivière, en fonction du niveau d'eau de la nappe, les échanges nappe-rivière se font dans l'un ou l'autre sens :

$$Q = C.(R_E - B_E)$$

$$Q = C.(R_E - P_Z)$$

Avec :

C : conductance du milieu (L^2/T).

RE : niveau de rivière (L).

RB : Altitude du fond de l'Oued (L).

RZ : niveau piézométrique (L).

L'estimation des trois paramètres de la formule :

1. Les cotes de lit de l'Oued Touil sont extraites de modèle numérique de terrain(MNT).
2. La largeur de l'Oued correspond à la surface de la maille.
3. Le niveau d'eau est établi à partir de la carte piézométrique de 1985 pour chaque maille.

Le débit échangé est limité par la capacité d'infiltration du lit de l'Oued, la hauteur de la lame d'eau dans le l'Oued et la hauteur de la piézométrique.

La quantité de flux échangée est régulée par la valeur de la conductance C (L^2/T) du lit du cours d'eau qui s'écrit :

$$C_{riv} = \frac{K_{riv} \times L \times W_{riv}}{M_{riv}}$$

Avec :

K_{riv} : perméabilité verticale des matériaux du lit de l'Oued (L/T).

L : la larguer de l'Oued dans la maille (L).

W_{riv} : la longueur de l'Oued dans la maille (L).

M_{riv} : épaisseur du lit de l'Oued (L).

Les valeurs de la conductance, varient entre $5,36.10^{-4}$ et $3,70.10^{-2}$ et m^2/s . Ces valeurs sont extraites des travaux antérieurs (ANRH, 2008).

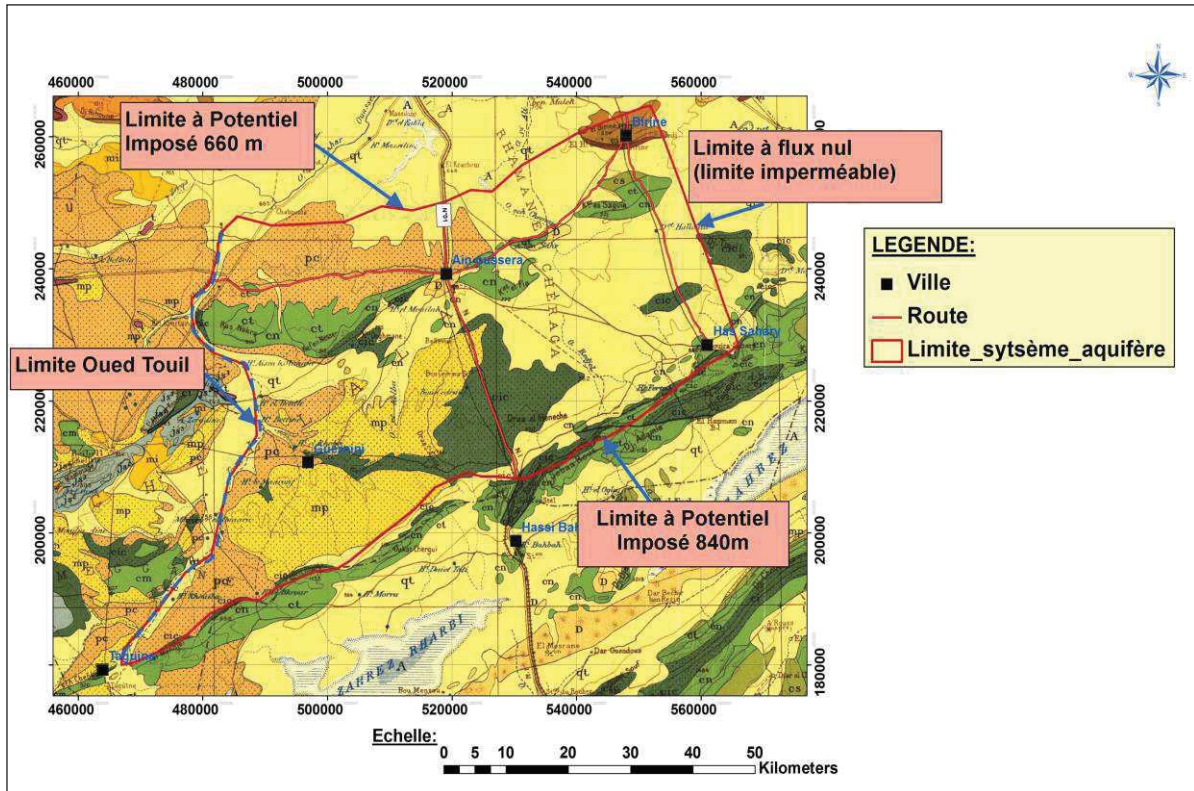


Fig.V.10 : Carte des conditions aux limites du domaine modélisé

V.3.9. Prélèvements

➤ Approvisionnement en eau potable

Les données issues de la base de donnée de la DRE de Djelfa et les chroniques des volumes extraits annuellement de la nappe aquifère, ont été calculés sur la période de 1985 à 2014 en tenant compte de :

- l'évolution de la population.
- Date de la mise en service des forages.
- En considérant que le débit extrait de chaque ouvrage est constant durant une année d'exploitation.

Les données de l'évolution de la population de la plaine d'Ain Oussera est mentionnées dans le tableau ci-dessous

Tableau.V.2 : L'évolution de la population de la plaine d'Ain Oussera (ONS, 2008).

Commune	1987	1998	2001	2008	2013	2014	2020	2024
Ain Oussera	46610	82597	92910	147244	182612	189679	229541	256129
Benhar	10329	10380	10695	11749	12864	13068	15594	17278
Birine	19438	26617	29425	40324	49461	50951	65323	74903
El Khemis	2345	4769	4884	8694	12239	12742	20608	25852
Guernini	2172	4038	4198	6556	9307	9694	16972	21824
Had Sahary	15436	22277	24201	39357	52218	54156	76849	91977
Bouirait Lahdab	5957	8897	9194	14113	17877	18471	24343	28255
Total	102287	159575	17550	268037	336578	348761	449230	516218

L'observation du Figure.V.11 et le Figure.V.12, montrent une croissance de la population de la région d'étude durant la période 1987 jusqu'à 2024 avec un taux de croisement moyen de l'ordre de 2.17%. Notons que la grande croissance est enregistrée au niveau de la ville d'Ain Oussera et Had Sahary.

En absence des données on rétablie le chronique des prélèvements d'eau de la nappe aquifère pour le besoin de l'AEP en basant sur l'évolution du prélèvement qui est proportionnelle à la croissance de la population et on considère que 90% de la population bénéficie de l'eau de l'AEP.

Les points d'eaux qui sollicitent la plaine d'Ain Oussera est sollicitée sont 34 forages, destinés à l'alimentation en eau potable de la population de la plaine et les communes limitrophes. Le débit moyen mobilisé est de 808 l/s.

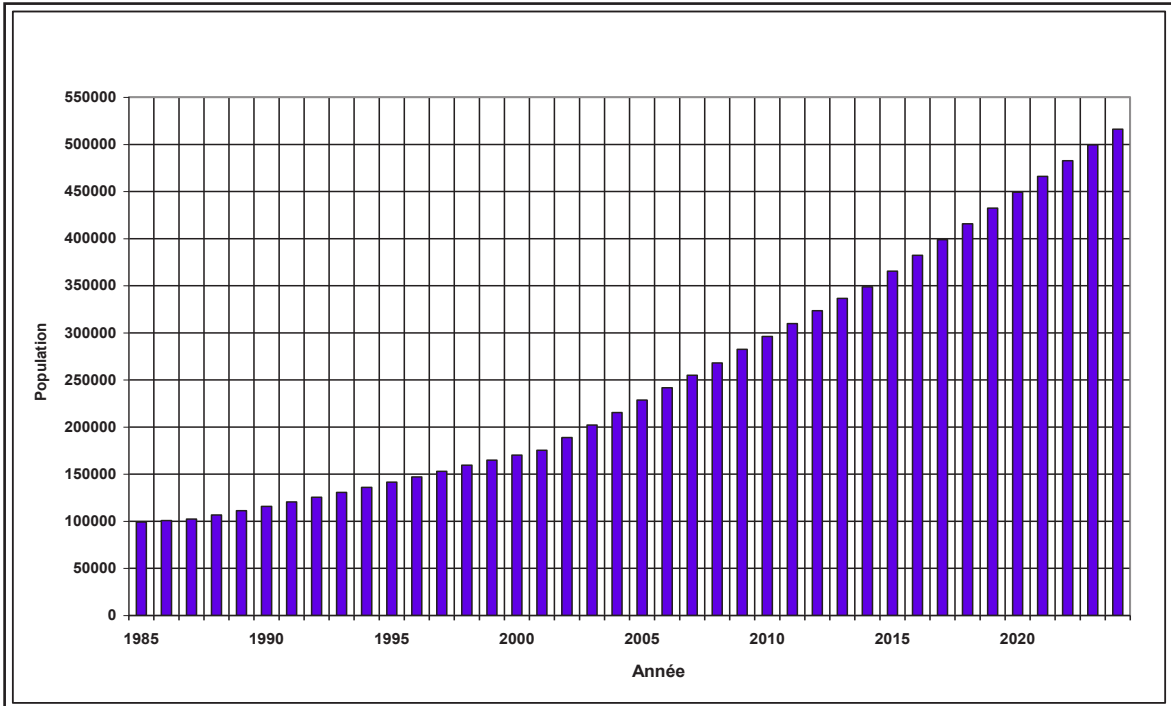


Fig.V.11 : L'évolution de la population de la plaine d'Ain Oussera

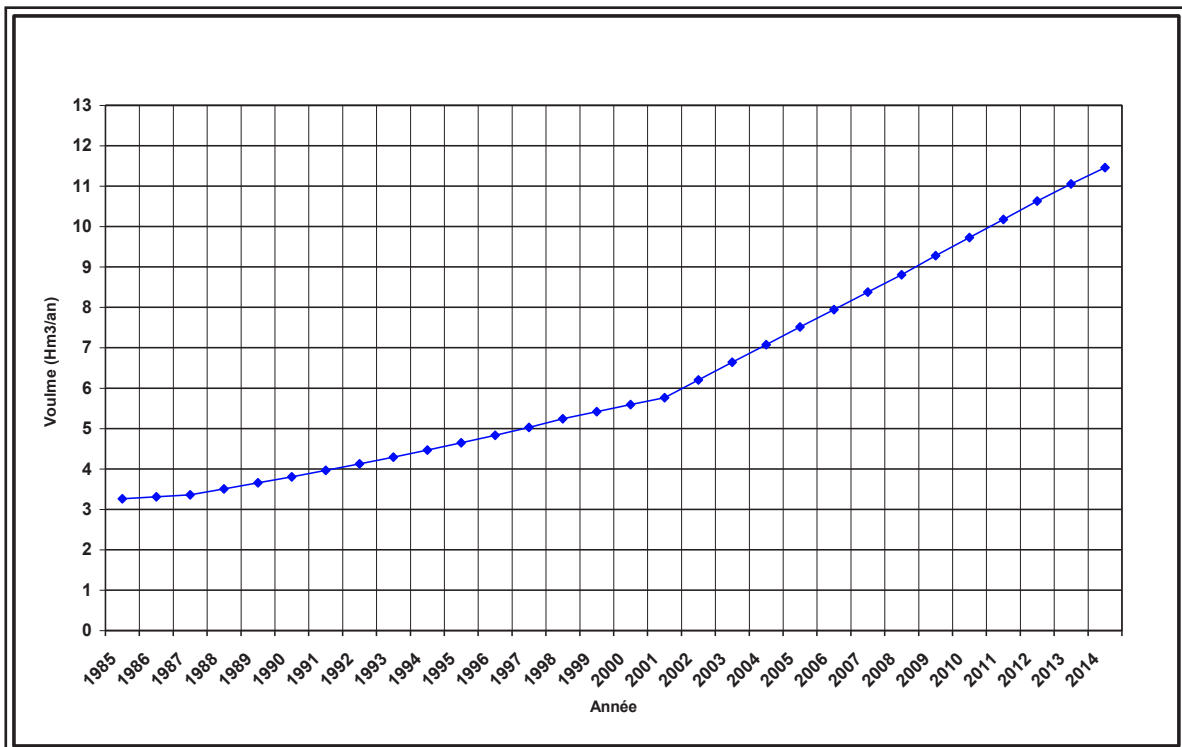


Fig.V.12 : L'évolution des prélèvements annuelle destinée à l'AEP

➤ Usage agricole

L'estimation des prélèvements destinés à l'agriculture entre la période 1985 et 2014 est basée sur recensement des points d'eaux effectué par le service de l'ANRH de 1994 à 2004 et actualisé en 2014. Le nombre des points d'eau recensés est de 957. Le débit moyen de chaque forage est de 06 l/s et la fréquence de pompage est de 3 à 4 heures par jour. Le volume totale prélevé est de 25.63 Hm³/an.

La surface irriguée dans la plaine d'Ain Oussera est de l'ordre de 13268 hectares, le volume total prélevé pour l'usage agricole est de 26.15 Hm³/an.

Notons que :

- 67.25% de ces surfaces irrigués se situent dans la commune de Benhar et Birine.
- Le croisement des prélèvements d'eau destinée à l'irrigation est passé par deux périodes (Fig.V.13) :
 - La première période allant de 1989 à 1991 : l'évolution des prélèvements est presque linéaire.
 - La deuxième période allant de 1991 à 2002 : c'est une évolution rapide et qui revient essentiellement lors du lancement des différents programmes de développements agricole (FRNDA et GCA).

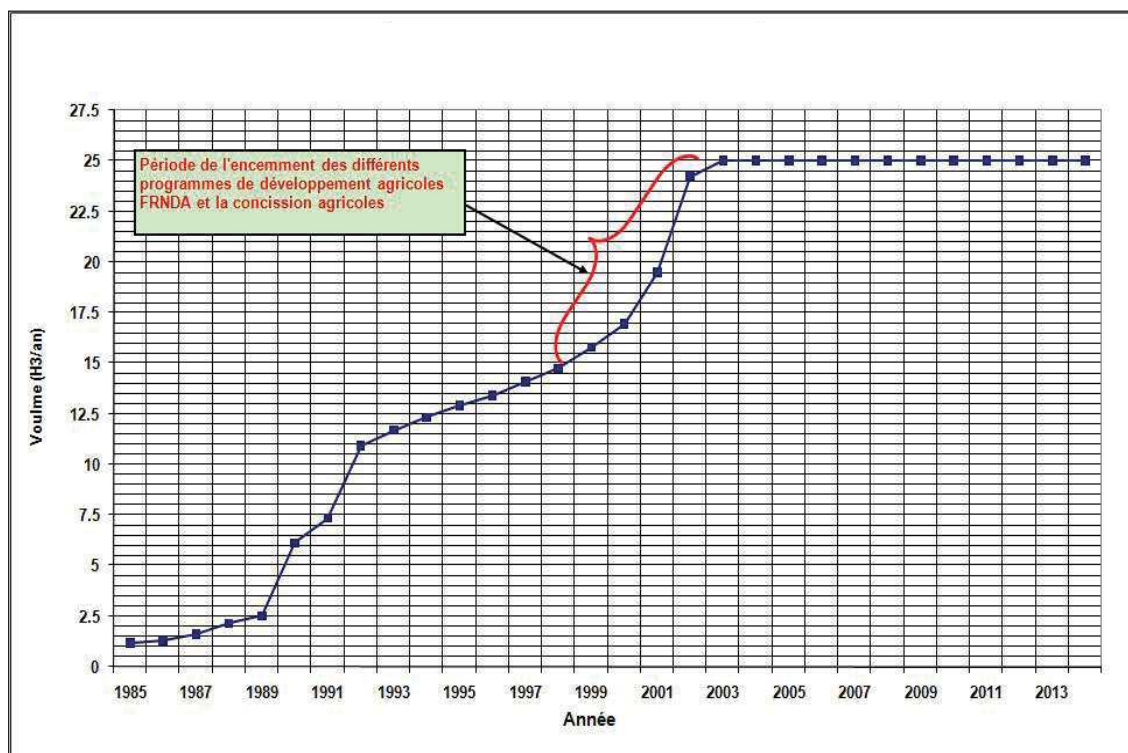


Fig.V.13 : L'évolution des prélèvements annuelle destinée à l'agriculture

V.3.10. Maillage

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. 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.

La zone d'étude a été discrétisée de façon régulière en maille carrées de 500 m x 500 m de côté, soit un total de 37800 mailles (Fig.V.14).

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

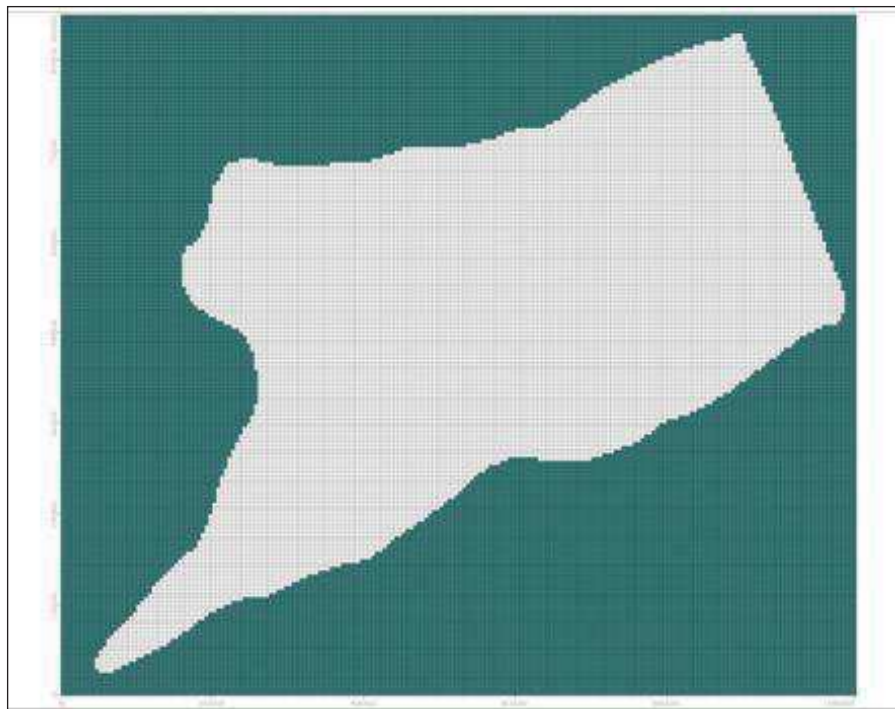


Fig.V.14 : Vue en plan du maillage 2D

V.3.11. période de simulation et points de contrôle de la qualité du modèle

Dans un premier temps, le modèle a été calé en régime permanent par rapport à l'état de référence de mai 1985.

Une simulation transitoire a ensuite été effectuée entre 1985 et 2014, 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 de 1985 et 2014, 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. Comme cela a été évoqué les points de calage permettant de vérifier la validité du modèle sont :

- L'allure générale des cartes piézométriques établies en 1985 et 2014, en particulier les directions d'écoulement, les gradients hydrauliques et les rabattements observés entre ces deux dates
- Les tendances interannuelles des évolutions piézométriques disponibles sur le secteur (réseau ANRH).

V.4. Conclusion partielle

L'analyse des données collectées a permis de déterminer les paramètres géométriques et les caractéristiques hydrodynamiques du système aquifère de la plaine d'Ain Oussera. Nous citons :

- La géométrie de l'aquifère a été déterminée à partir des données de la géophysique et les coupes géologique des forages.
- Le système aquifère de l'albien sera représenté comme un modèle d'écoulement monocouche.
- Les limites du modèle sont définies avec les limites géologiques de la formation de l'Albien.
- Tous les points d'eaux qui sollicitent la nappe aquifère sont pris en compte dans le modèle.
- Oued Touil est considéré comme une limite de potentiel, Le logiciel de la modélisation MODFLOW et à l'aide de module River Package simule les flux d'échanges.

V.5. Etude du fonctionnement hydrodynamique de la nappe à l'aide de la modélisation hydrogéologique

Compte tenu des divers éléments issus de l'étude géologique et des connaissances hydrogéologiques concernant la plaine d'Ain Oussera, il est possible d'appliquer des modèles de simulation des nappes afin de contrôler l'état actuel de la ressource et d'évaluer les effets des interventions anthropiques sur le milieu. Pour ce faire, le modèle VISUAL MODFLOW, est utilisé en régime permanent et transitoire pour simuler les écoulements souterrains, vérifier les hypothèses et identifier les valeurs des paramètres hydrodynamiques de notre système aquifère par la résolution de l'équation de diffusivité en faisant appel à la méthode des différences finies.

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.

V.5.1. Régime Permanent

La première étape le modèle sera calé en régime permanent correspond à l'état initial du système aquifère, la carte piézométrique de référence retenue est celle de l'année 1985. Le nombre des points d'observation qui servira au calage est de 32 piézomètres (Fig.V.7), Le but de cette phase de calage est :

- Vérification les choix des conditions aux limites.
- Déterminer les paramètres hydrodynamiques du système aquifère.

V.5.1.1. Calage du modèle pour l'année 1985

Le calage du modèle numérique consiste à ajuster les paramètres du modèle afin de reproduire le comportement global de l'aquifère. Pour cela, les résultats issus des simulations sont comparés aux observations disponibles, la reproduction du comportement global de l'aquifère atteste alors de la qualité du modèle numérique.

Une des difficultés de cette approche réside dans le fait qu'il est supposé qu'un régime permanent existe à une date donnée, c'est-à-dire qu'il y a une période où les entrées d'eau dans le système sont égales aux sorties, la nappe est donc supposée restée stable.

Cette phase consiste à un certain nombre de simulations réalisées pour obtenir une bonne concordance entre les potentiels mesurés et les potentiels calculés. La qualité du calage peut être appréciée en examinant successivement les points suivants :

- La répartition de la perméabilité
- La reproduction de la piézométrie
- L'examen du bilan issu du calage.

V.5.1.2. Résultats du calage en régime permanent

V.5.1.2.1. Piézométrie calée

La piézométrie simulée est bien corrélée avec la piézométrie observée (Fig.V.14). En effet, le coefficient de corrélation entre piézométrie observée et piézométrie simulée est très proche de 1.

L'analyse statistique des résultats du calage du modèle présente des valeurs acceptables. La carte piézométrique calculée montre la bonne concordance générale entre le sens d'écoulement restitué par le modèle et le sens d'écoulement mesurée. La charge piézométrique de la nappe de l'albien est bien restituée. Les gradients hydrauliques de la nappe aquifère sont globalement respectés, ce dernier est fort au Sud de la plaine et faible au centre et au Nord (Fig.V.15). Le graphe de calibrage montre que la majorité des points se trouvent à proximité de la droite de la corrélation qui illustre la concordance entre les valeurs calculées et les valeurs observées.

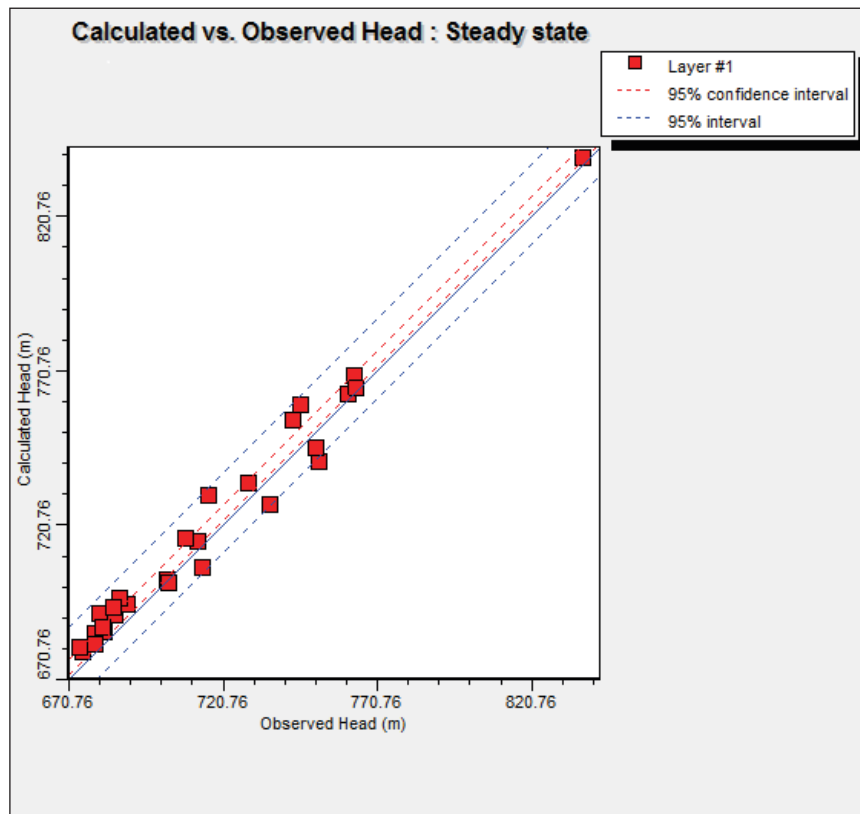


Fig.V.14 : Comparaison entre piézométrie calculée et piézométrie observée

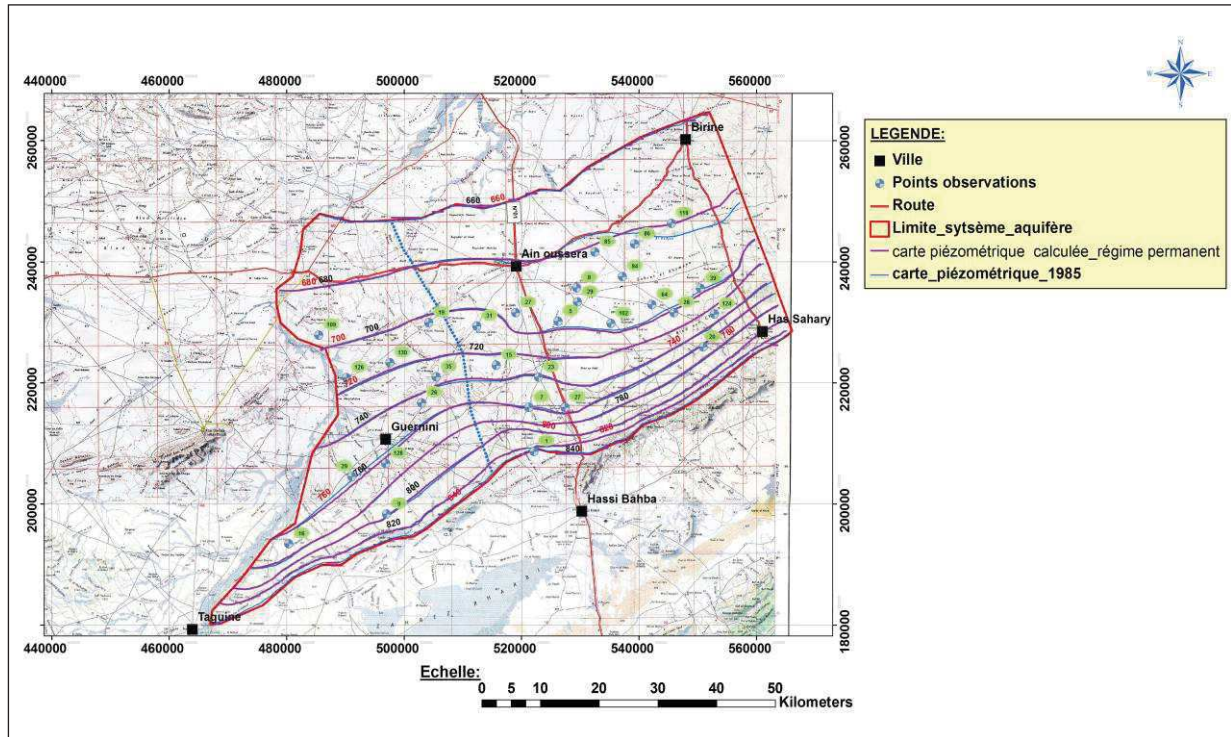


Fig.V.15 : La différence entre valeurs mesurées et valeurs calculées du niveau piézométrique après calibration du modèle, en régime permanent (mai 1985)

Les écarts entre les potentiels calculés et les potentiels mesurés sont donnés sur le tableau.V.3 suivant :

Tableau.V.3 : Résultat du calage en régime permanent

Piézomètre	X	Y	H mesurée (m)	H calculée (m)	Hcal-Hmes (m)
102/1	535231	229765	685.72	687.7633	2.04
109/1	485485	227828	689.64	691.926	2.28
119/1	545518	246294	674.99	675.9606	1.97
126/1	490225	220800	712.4	713.5424	1.14
128/1	496887	206620	761.16	763.4388	2.27
130/1	497575	223256	708.6	709.5226	1.92
15A/1	522100	208625	837.34	840	2.66
15B/1	529400	235650	682.29	684.2755	1.98
35/1	505456	220947	728.93	729.3154	0.38
36B/1	480375	193350	763.4	765.1288	1.72
59A/1	504214	229881	702.69	703.0593	0.36
59B/1	550976	225867	763.64	765.237	1.597
84/1	537167	237506	679.31	680.4534	1.14
86/1	539250	242900	679.19	682.1787	2.98
9A/1	502957	216664	750.77	749.6444	-1.12
P7/1	545973	231540	702.93	702.1237	-0.80
P9/1	529515	233313	681.61	682.7357	1.12

La carte piézométrique calculée montre la bonne concordance générale entre le sens d'écoulement restitué par le modèle et le sens d'écoulement mesuré. La charge piézométrique de la nappe de l'albien est bien restituée. Les gradients hydrauliques de la nappe aquifère sont globalement respectés (Fig.V.15). La différence entre la majorité des charges calculées et mesurées varient entre 0.36 m et 2.98 m ce qui correspond à une calibration très satisfaisante.

V.5.1.2.2. Paramètres de calage

Les valeurs de la perméabilité d'ajustement sont extrêmement hétérogènes et varient entre $1,5 \cdot 10^{-6}$ m/s et $4,6 \cdot 10^{-4}$. En comparaison avec les valeurs issues par les essais de pompages on remarque qu'il ya une concordance dans la zone Est et Nord du système aquifère, par contre dans la zone Sud -Ouest (Guernini) les valeurs calculées et mesurées ne sont pas comparables, la perméabilité mesurée varie entre 2 et $3,5 \cdot 10^{-5}$ m/s, par contre les valeurs calculées oscillent entre $0,015 \cdot 10^{-5}$ et $1 \cdot 10^{-5}$ m/s. Cet écart peut être justifié par l'hétérogénéité des formations de l'aquifère albien et à l'épaisseur de la nappe d'eau.

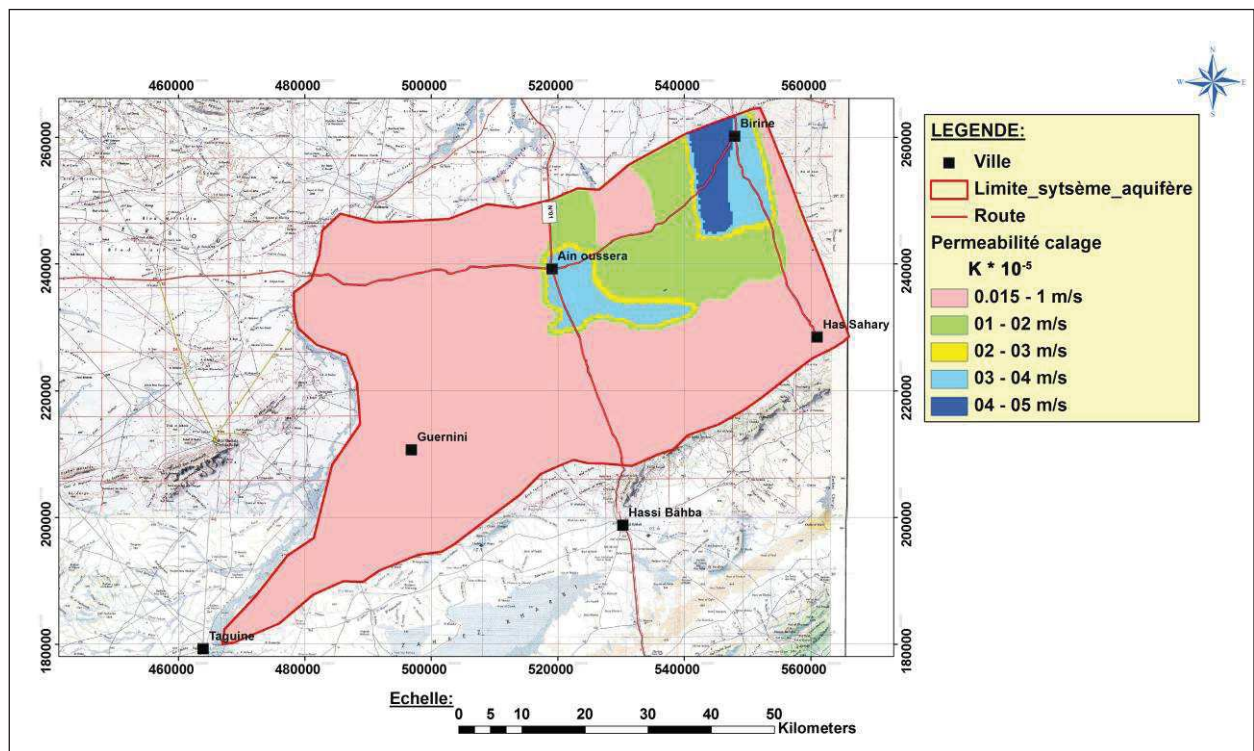


Fig.V.16 : Répartition spatiale des perméabilités adoptées pour le calage en régime permanent année 1985

V.5.1.2.3. Bilan des flux

Un bilan a été effectué de façon à mieux cerner le fonctionnement global du système aquifère. Le tableau .V.4 présente le bilan des volumes moyens échangés par le système aquifère de la plaine d’Ain Oussera.

Tableau.V.4 : Bilan hydraulique calculé dans le cas du régime permanent établi pour l’année 1985

Entrés (Hm³/an)	Sorties (Hm³/an)
Frontière Sud = 17.549	Frontière Nord = 51.686
Pompages = 0	Prélèvement = 3.102
Recharge = 52.298	Recharge = 0
Alimentation par Oued Touil = 3.767	Drainage par Oued Touil = 18.827
Total IN = 73.614	Total OUT = 73.615
Bilan hydraulique	IN - OUT= 0.00139

L’observation de valeurs portées dans le tableau ci-dessus montre ce qui suit:

- Les flux sortant du flanc Nord du système constitue 306 % du flux entrant de la partie sud de la nappe aquifère.
- La recharge par précipitation constitue les principales sources d’alimentation de la nappe aquifère, elle est de 52.298 Hm³/an.
- Le flux drainé par Oued Touil est de 18.827 Hm³/an, soit 26.38% de volume d’alimentation. Il est important de signaler que l’alimentation de la nappe par Oued Touil ne constitue que 5.11% du volume d’alimentation global.

V.5.2. Régime Transitoire

La seconde étape des simulations est effectuée afin de faire le point sur les effets engendrés par l’accroissement des prélèvements effectués depuis 1985 à 2014. Le calage en régime transitoire, a plus au moins long terme, couvre une période de 29 ans au cours de laquelle des relevés ont été effectués piézométriques. Les potentiels précédents calculés en régime permanent sont utilisés comme des valeurs initiales. Le calage du modèle en régime transitoire a nécessité plusieurs simulations. Au cours de cette phase, la reproduction des fluctuations piézométriques des aquifères a permis d’ajuster au mieux les coefficients d’emménagement utilisés par le modèle. Les valeurs initiales des caractéristiques hydrodynamiques des nappes ont été introduites puis réajustées au cours du calage. Les données d’observation prises en compte pour le calage sont les évolutions du réseau d’observation de l’ANRH.

V.5.2.1. Paramètres de calage

Le coefficient d’emmagasinement constitue le seul paramètre intégrer lorsqu’on passe d’un régime permanent à un régime transitoire. Afin d’affiner la distribution spatiale de ce paramètre, nous avons effectué plusieurs simulation tout en respectant la nature lithologique de la formation aquifère. Les valeurs du coefficient d’emmagasinement retenues varient entre 10^{-5} et $2 \cdot 10^{-1}$.

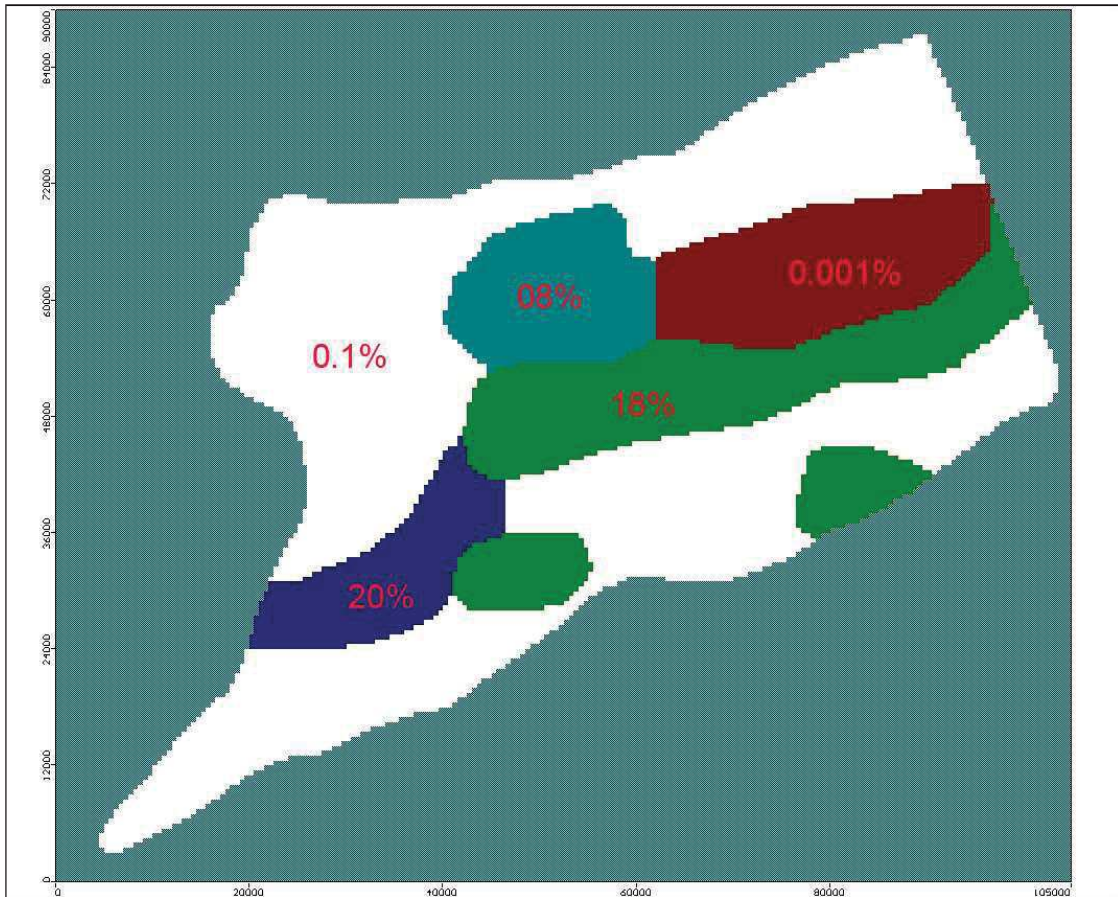


Fig.V.17 : Répartition spatiale des coefficients d emmagasinement adoptés pour le calage

V.5.2.2. Résultats du calage en régime Transitoire

V.5.2.2.1. Chronique de la piézométrie 1985-2014

La simulation en régime transitoire effectuée entre l’année 1985 et 2014 soit une période de 29 ans, a permis de reproduire la fluctuation piézométrique, les hauteurs piézométriques calculées et ceux mesurées sont en général cohérentes. L’écart entre les valeurs simulées et observées varie entre 0.04 m (point 126) et 2.03 m (Point 84). Cette différence des valeurs revient au manque des données de certains paramètres comme le débit d’exploitation réelle surtout dans la période de sécheresse, et l’incertitude de certaines données comme l’impact des points d’eaux. Cela correspond à un bon ajustement dans le cadre d’un modèle régional et au vue des données disponibles.

Les résultats montrent les niveaux d'eau calculés qui montrent la baisse piézométrique observée liée à l'exploitation de la nappe pour l'agriculture entre 1985 et 2014. Les données issues de la simulation sont mentionnées dans le tableau ci-dessous.

Tableau.V.5 : Résultat du calage en régime transitoire 2014

Piézomètre	X	Y	H mesurée (m)	H calculée (m)	Hcal-Hmes (m)
10	553600	226000	775.35	776.73	1.37
124	552812	231331	734.16	733.6063	-1.55
126	490225	220800	713.96	713.9143	-0.04
130	497575	223256	719.12	717.5747	-1.54
21	523780	236659	673.32	673.6823	0.36
26	505363	208624	784.06	783.5071	-0.55
27	518999	231533	688.7	686.9951	-1.70
39	550492	235538	690.67	692.573	1.90
47	485650	205950	748.2	746.5881	-1.61
7	521283	215888	757.69	759.1733	1.48
84	537167	237506	659.72	661.7517	2.03
PZ9	529515	233313	677.17	678.9805	1.81
PZ11	523687	225999	712.65	711.0745	-1.57
PZ12	527400	215874	749.41	751.6238	1.21
PZ3	540112	233082	676.5	677.937	1.43
PZ4	546747	237921	673.02	674.7372	1.71
PZ5	548256	243105	674.85	673.8658	-0.98
PZ7	545973	231540	697.48	697.7446	0.26

Les figures ci-dessous présentent la chronique piézométrique simulée et observée de quelques piézomètres représentatifs.

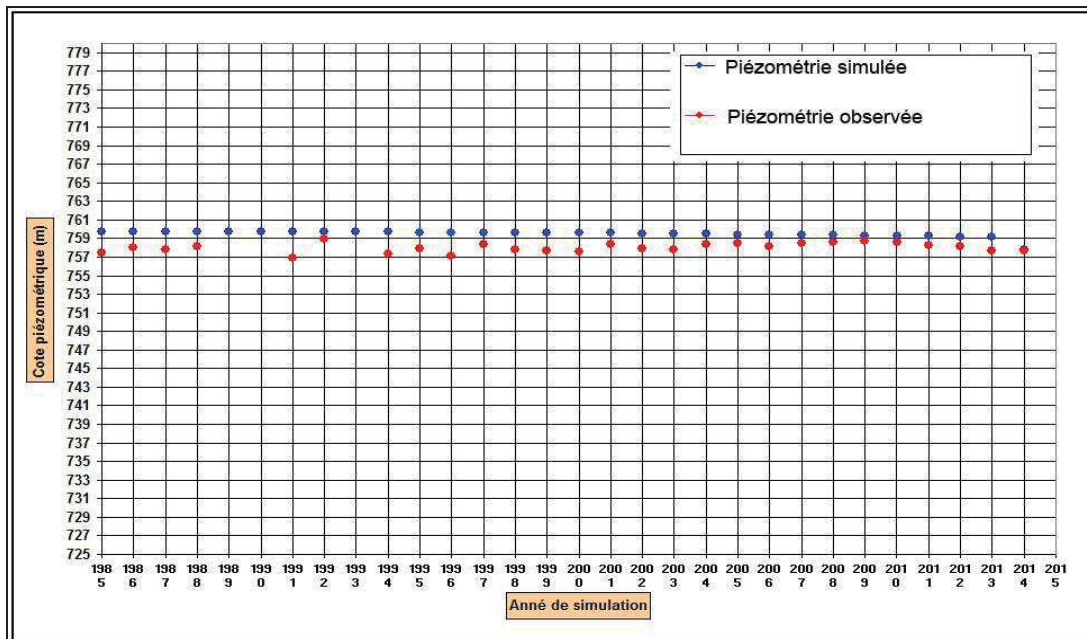


Fig.V.18 : Courbe piézométrique simulée et observée sur le piézomètre 07

L'évolution des hauteurs piézométriques observées, pour le piézomètre 7, entre 1985 et 2014 sont bien reproduites par la simulation. L'écart entre la valeur calculée est simulée est de 1.48 m.

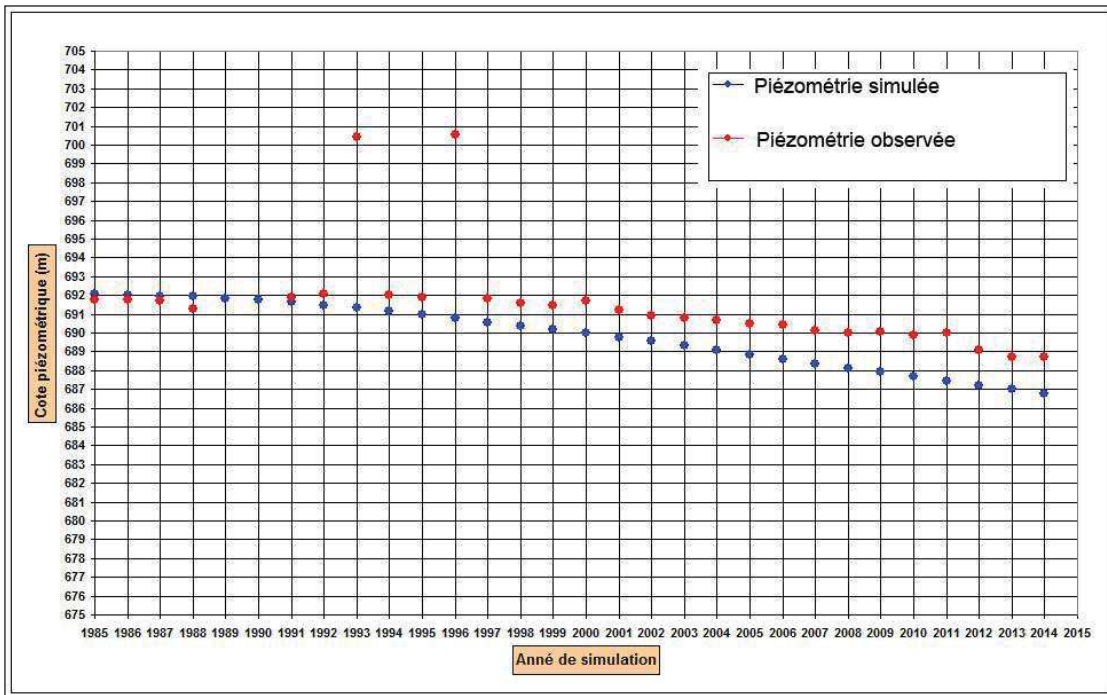


Fig.V.19 : Courbe piézométrique simulée et observée sur le piézomètre 27

L'évolution des hauteurs piézométriques observées, pour le piézomètre 27, entre 1985 et 2014 sont bien reproduites par la simulation. L'écart entre la valeur calculée est simulée est de 1.70 m.

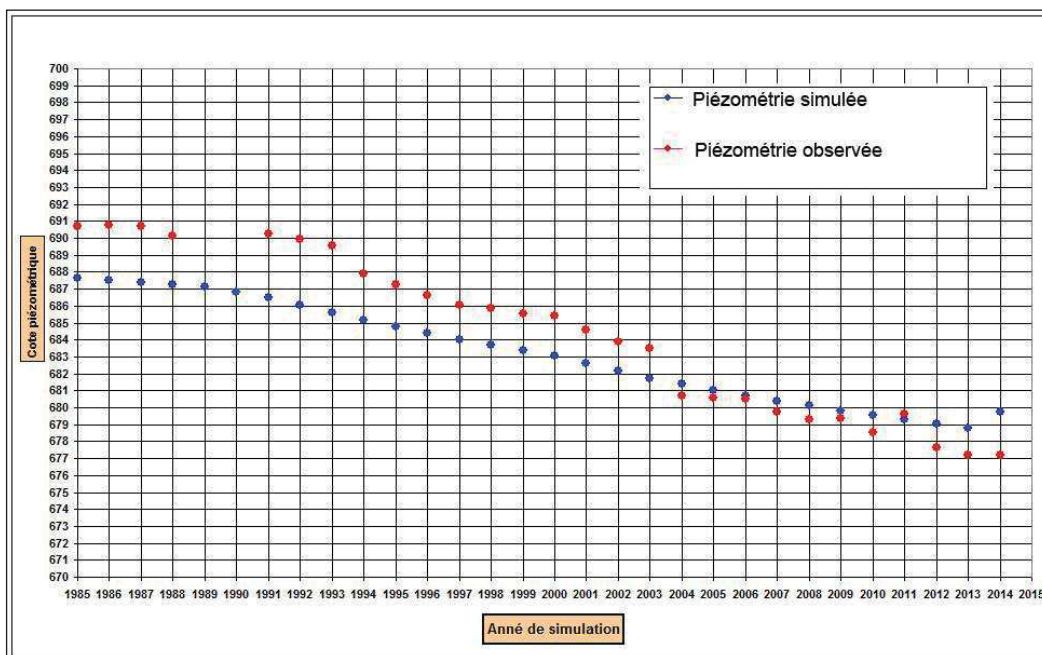


Fig.V.20 : Courbe piézométrique simulée et observée sur le piézomètre PZ09

Au niveau du piézomètre PZ09 la variation piézométrique calculée restitue bien la variation de la piézométrie, surtout la baisse du niveau piézométrique enregistré qui est de l'ordre de 13.54 m. L'écart entre les valeurs simulées et calculées de 1.81m.

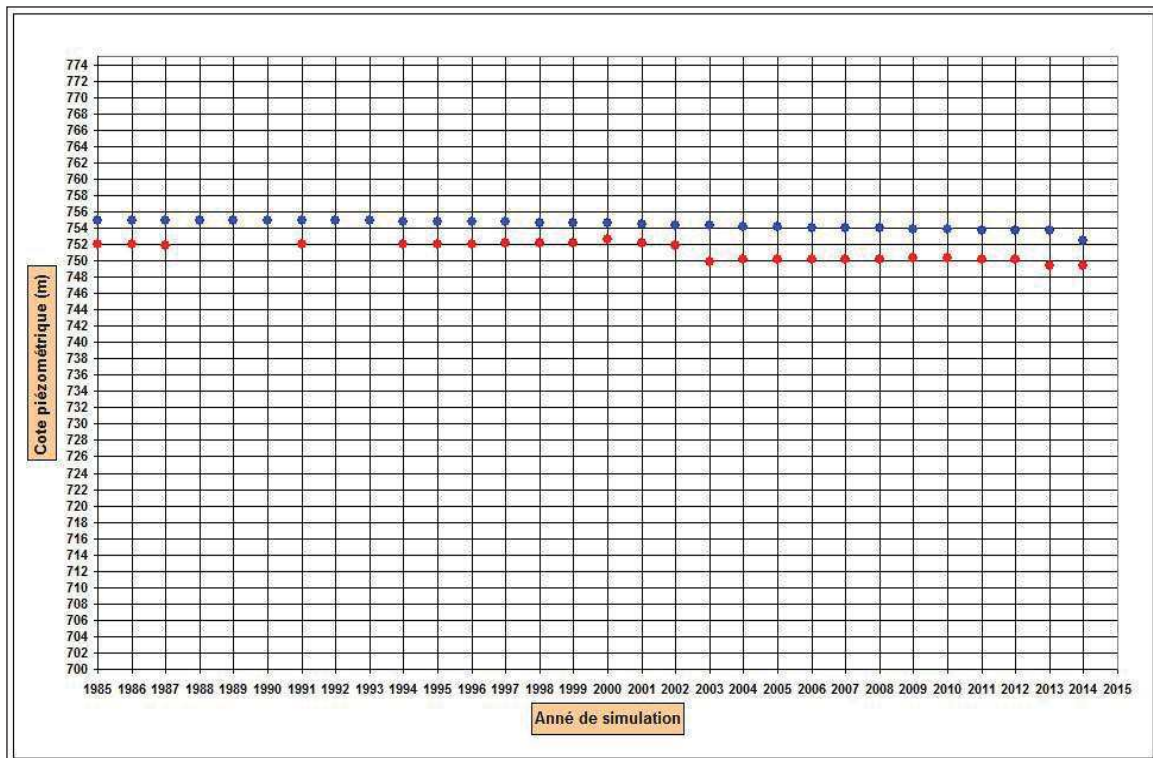


Fig.V.21 : Courbe piézométrique simulée et observée sur le piézomètre PZ12

Au niveau du piézomètre PZ12 la variation piézométrique calculée restitue bien la variation de la piézométrie, la baisse du niveau piézométrique enregistré qui est de l'ordre de 2.64 m. L'écart entre les valeurs simulées et calculées de 1.21m.

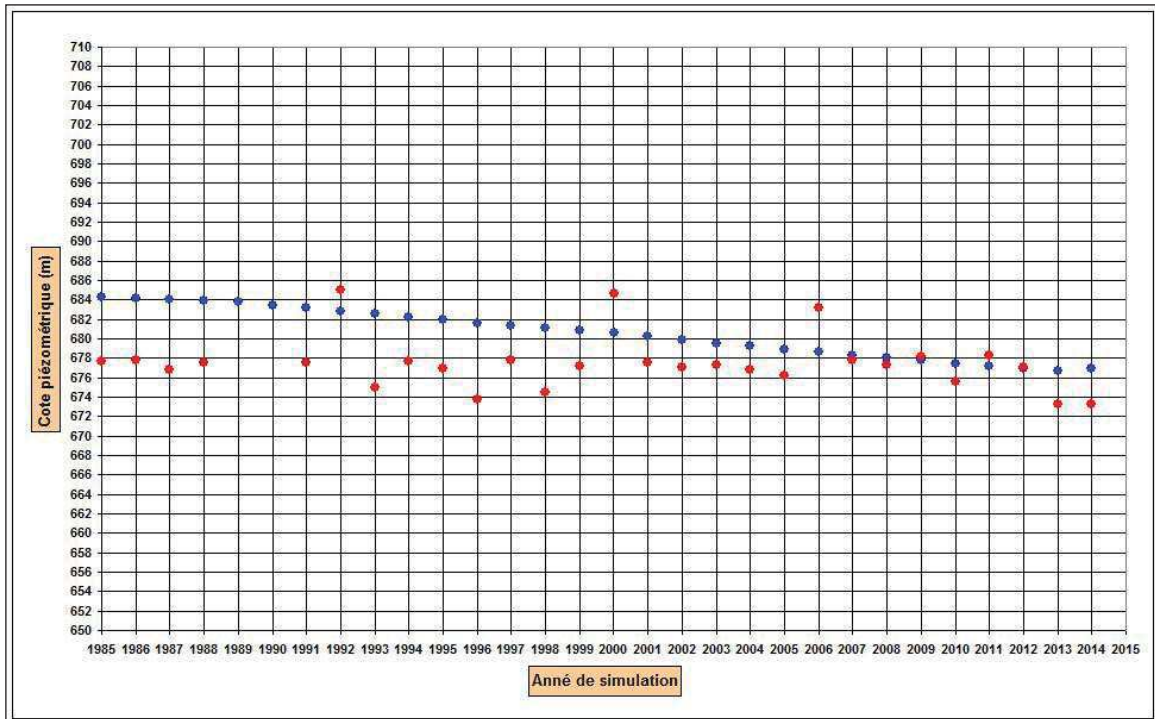


Fig.V.22 : Courbe piézométrique simulée et observée sur le piézomètre PZ21

Au niveau du piézomètre PZ21, la chronique piézométrique mesurée entre la période 1985 et 2014 n'est pas bien reproduite par la simulation, surtout entre la période 1985 et 2006 où elle est surestimée par le modèle, par contre entre 2006 et 2014 les valeurs sont bien cohérentes. L'écart entre les deux valeurs est de 2.01 m.

V.5.2.2.2. Piézométrie

L'état de la piézométrie simulée par modèle pour l'année 2014 est conforme avec la carte piézométrique mesurée. Les charges piézométriques de la nappe de l'Albien inférieur sont bien restituées. Tous les axes principaux d'écoulement, ainsi les axes de drainage induit par l'Oued Touil sont présentés dans la Figure 23. La carte permet de visualiser deux zones importantes :

- La zone de dépression au niveau du plateau de Sersou, et qui revient à la forte exploitation de la nappe par les forages.
- La zone Ouest de nappe où on remarque l'effet de drainage de la nappe aquifère par Oued Touil.

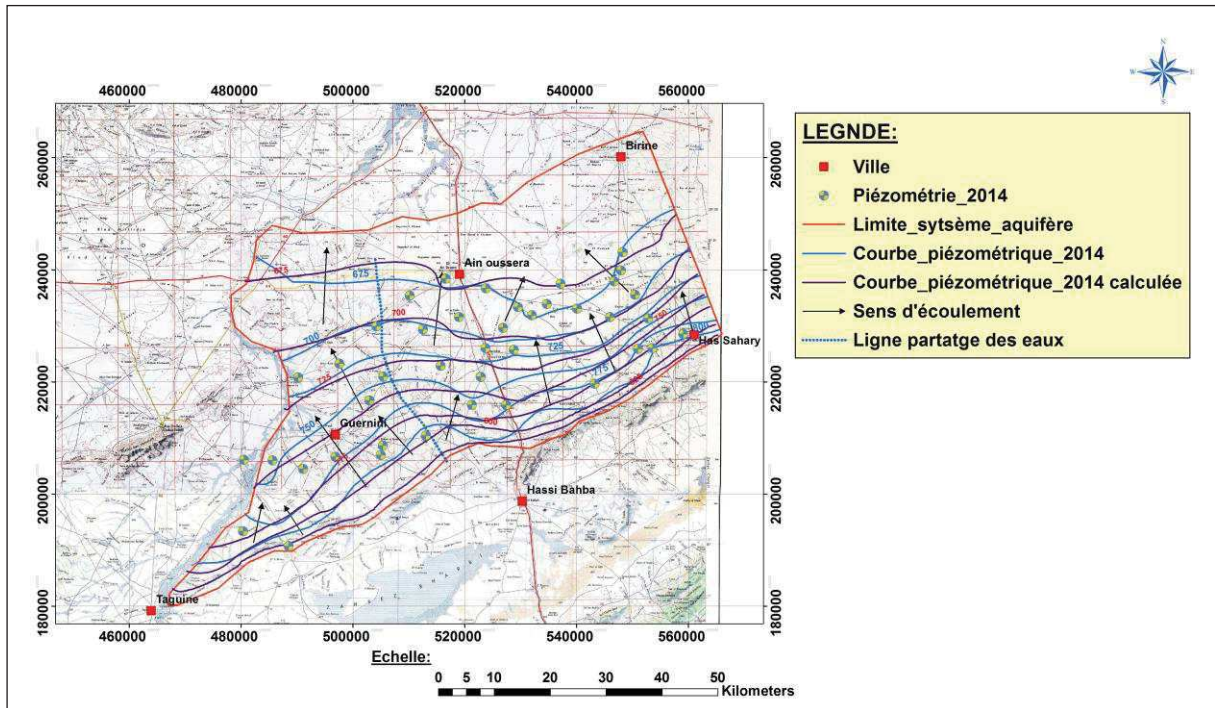


Fig.V.23 : Superposition des cartes piézométriques observée et calculée en régime transitoire (Mai 2014)

V.5.2.2.3. Bilan hydraulique de la nappe

Le bilan hydraulique de la nappe aquifère de l'Albien pour un régime transitoire calculé par le modèle est représenté au tableau ci-dessous.

Tableau.V.6 : Bilan hydraulique calculé dans le cas du régime Transitoire établi pour l'année 2014

Entrés (Hm ³ /an)	Sorties (Hm ³ /an)
Frontière Sud = 17.610	Frontière Nord = 38.12
Pompages = 0	Forage = 34.56
Infiltration = 52.298	Infiltration = 0
Alimentation par Oued Touil = 4.94	Drainage par Oued Touil = 18.10
Total IN = 74.84	Total OUT = 90.78
Bilan hydraulique	IN - OUT = -15.94

L'observation de valeurs portées dans le tableau ci-dessus montre ce qui suit:

- Une diminution des flux sortants du flanc Nord du système de 29.12 %
- La recharge par précipitation constitue les principales sources d'alimentation de la nappe aquifère, elle est de 52.298 Hm³/an.
- Le flux drainé par Oued Touil est de 18.10 Hm³/an, soit 24.10% du volume d'alimentation. Il est important de signaler l'influence de la baisse de la nappe d'eau dans la zone ouest sur le volume drainé par Oued Touil, où on remarque qu'il ya une diminution de 1.727 Hm³.
- Le volume d'eau extrait par les forages est de 34.56 Hm³ soit 46.17% de l'alimentation globale de la nappe aquifère

V.6. Conclusion partielle

Le calage en régime permanent a permet de restituer l'état initial de la nappe aquifère albienne, par comparaison de la piézométrie de l'année 1985. L'état piézométrique simulé est plus proche à la piézométrie mesurée.

En régime transitoire la chronique piézométrique entre la période 1985 à 2014 est restituée
L'analyse de situation de l'année 2014 et le bilan des flux montrent :

- Déstockage très important de la nappe aquifère par les forages d'eaux surtout au niveau du plateau du Sersou et au sud de Bérine, le volume extrait constitue 46.17% de l'alimentation globale de la nappe aquifère.
- Une baisse très importante de la piézométrie dans la partie Sud-Est de la plaine d'Ain Oussera.
- Le drainage par Oued Touil constitue 24.1% du volume d'alimentation générale de la nappe aquifère.

V.7. Exploitation du modèle

Les simulations prévisionnelles à long terme ont pour objectifs de prédire les impacts de l'exploitation actuelle et future de la plaine d'Ain Oussera, Pour définir des scénarios d'exploitation, il est possible de définir différentes hypothèses de prélèvement et considérer une hypothèse de recharge moyenne. Les scénarios 'exploratoires', il est possible de définir pour des hypothèses de prélèvements données, différentes hypothèses de recharge. Ainsi il est possible de tester le comportement (réactivité) de la nappe en conditions 'sévères'. L'intérêt de l'utilisation du modèle est non seulement de simuler l'impact sur l'évolution des nappes souterraines de scénarios (hypothèses) de prélèvement et de recharge mais aussi de pouvoir comparer les résultats des scénarios entre eux, les scénarios proposés sont des scénarios qui ont pour vocation de servir d'appui à la gestion de la ressource en eau.

V.7.1. Démarche adopté

Les scénarios seront simulés sur une période de (2014-2024). Cette période est considérée comme suffisante pour tester la réactivité de la nappe aquifère de l'Albien lorsqu'elle est soumise à des changements des conditions aux limites. Notons que les scénarios d'exploitations qui seront proposés sont:

1. Des projets déjà réalisés (des nouveaux champs captant et des projets de transfert d'eau entre communes).
2. Des projets en cours de la réalisation (des nouveaux périmètres agricoles).

V.7.2. Composant des scénarios

V.7.2.1. Prélèvement

➤ Alimentation en eau potable

La DRE de la wilaya de Djelfa (Direction de Ressource en Eau) a réalisé, entre la période 2014 et 2016, des nouveaux champs de captant pour subvenir les besoins en eaux potables de la population des communes de " Ain Feka, Had Sahary, Hassi Bahbah et Brouirait Lahdeb et la ville d'Ain oussera. Le débit mobilisé est de 630 l/s (Tableau.V.7). Ces forages seront mis en exploitation entre les périodes 2014 et 2020.

➤ Agriculture

L'hypothèse relative à l'irrigation est basée sur la réalisation de deux nouveaux périmètres agricoles. Ces derniers seront mis en service en 2019 (Fig.V.37) :

1. Commune de Guernini : 5000 Ha.
2. Commune de Guernini-Ain oussera: 2000 Ha.

➤ **Industrie**

Les prélèvements pour l'industrie sont très faibles et seront considérés comme nul.

➤ **Recharge**

La recharge utilisée dans les scénarios est la recharge moyenne calculée qui est de l'ordre de 11.43 mm/an.

Tableau.V.7 : Nouveaux forages pour les besoins en eaux potables (DRE)

Commune	Localité	Forage	Coordonnée		Q (l/s)
			XE	YN	
Had Sahary	Ouled Said	HS1	3°15'17.7"	35°27'50.1"	25
		HS2	3°13'28.6"	35°28'14.9"	35
		HS3	3°14'36.8"	35°28'12.6"	35
Ain Fekka		AF1	3°14'21.5"	35°29'0.9"	40
		AF2	3°14'58.8"	35°29'9.2"	40
		AF3	3°14'49.7"	35°29'49.1"	40
Ain Oussera		AO1	3°12'59.3"	35°28'50.6"	40
		AO2	3°12'32"	35°28'25"	40
		AO3	3°12'32"	35°27'41.1"	35
Ain Oussera	Route Khemis	Oussessira F1	2°49'48"	35°25'28"	35
		F13	2°52'19"	35°26'22"	35
		F14	2°52'54"	35°26'38"	25
		F15	2°49'7.4"	35°25'13.4"	35
		F16	2°48'38.1"	35°25'00"	20
Hassi Bahbah	Bouiret Lahdeb	HB11	3°06'51.15"	35°15'25.5"	25
		HB12	3°05'53.3"	35°15'25.2"	25
		HB13	3°4'22.37"	35°14'39.4"	25
		HB14	3°4'31.6"	35°15'36"	25
		HB15	3°04'49.7"	35°16'26.1"	25
		F3 Bouiret Lahdeb	3°07'54.95"	35°16'27.46"	25
Total		20	630		

V.7.2.2. Scénario simulés

Les scénarios proposés sont précisés dans le tableau ci-dessous.

Tableau.V.8 : Composantes des scénarios simulés

scénario	AEP	IRR	Recharge
Scenario de référence	constant	constant	moyenne
Scenario N°1	Mise en service des nouveaux champs captant	constant	moyenne
Scenario N°2	constant	Mise en service des nouveaux périmètres agricoles	moyenne

V.7.3. Résultats des simulations

Les résultats des simulations seront présentés sous forme des cartes des rabattements de la nappe entre la période 2014 et 2024, cartes piézométriques de l'année 2024 et des graphes qui présentent l'évolution annuelle des hauteurs piézométriques entre la période 1985 et 2024.

V.7.3.1. Scénario de référence

Pour le scénario de référence, les hypothèses suivantes ont été appliquées;

- ✓ Prélèvement constant durant la période 2014 à 2024.
- ✓ Recharge moyenne.

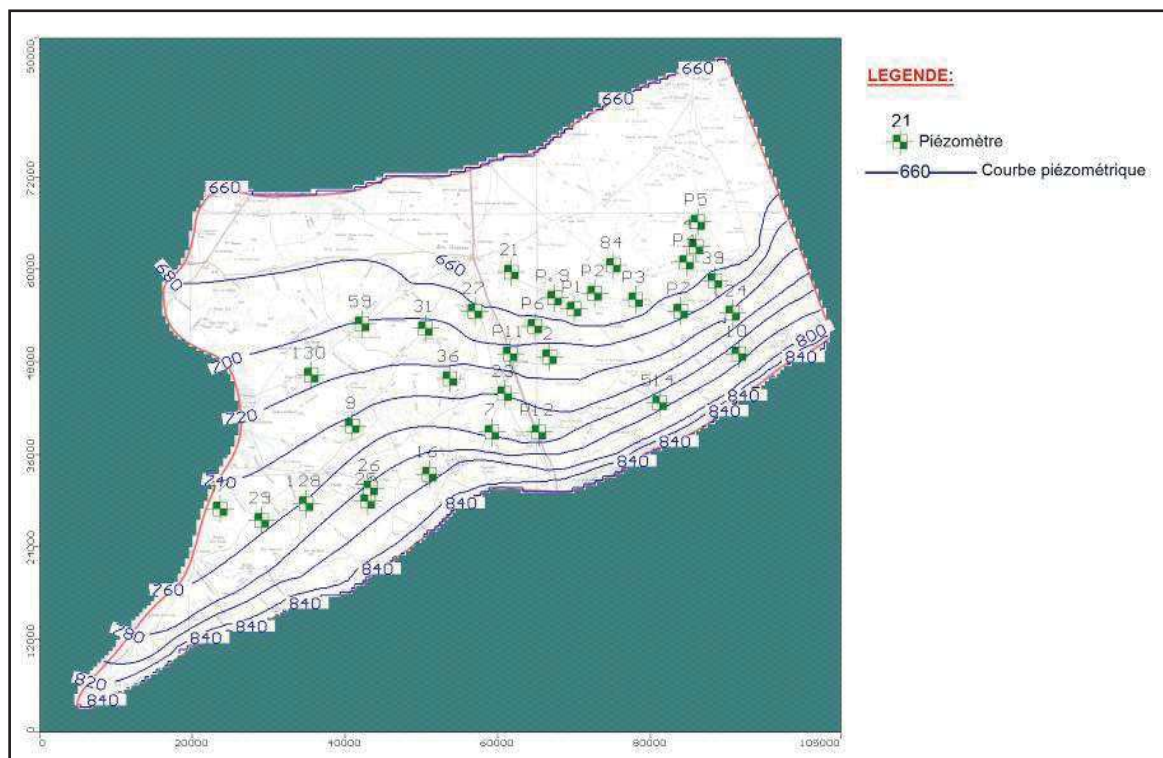


Fig.V.24 : Carte piézométrique simulée 2024

➤ Carte de rabattement

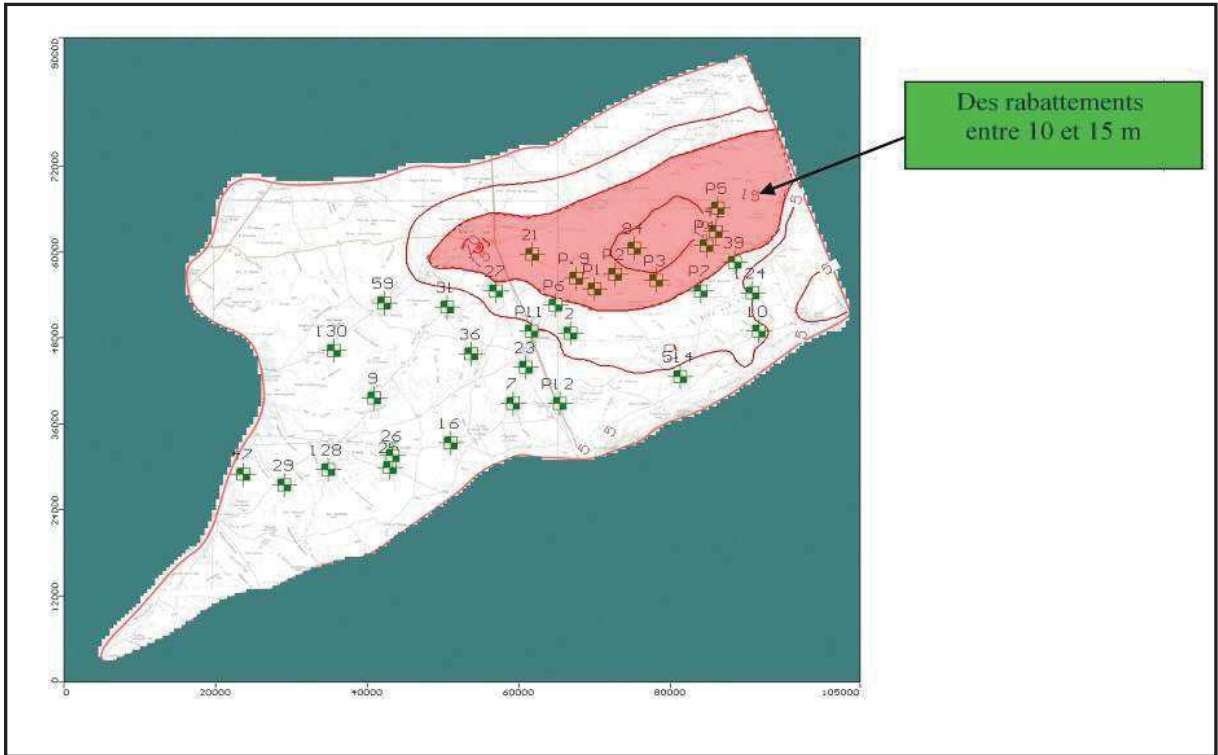


Fig.V.25: Scénario de référence -carte des rabattements de la nappe Albienne 2024

➤ Evolutions piézométriques

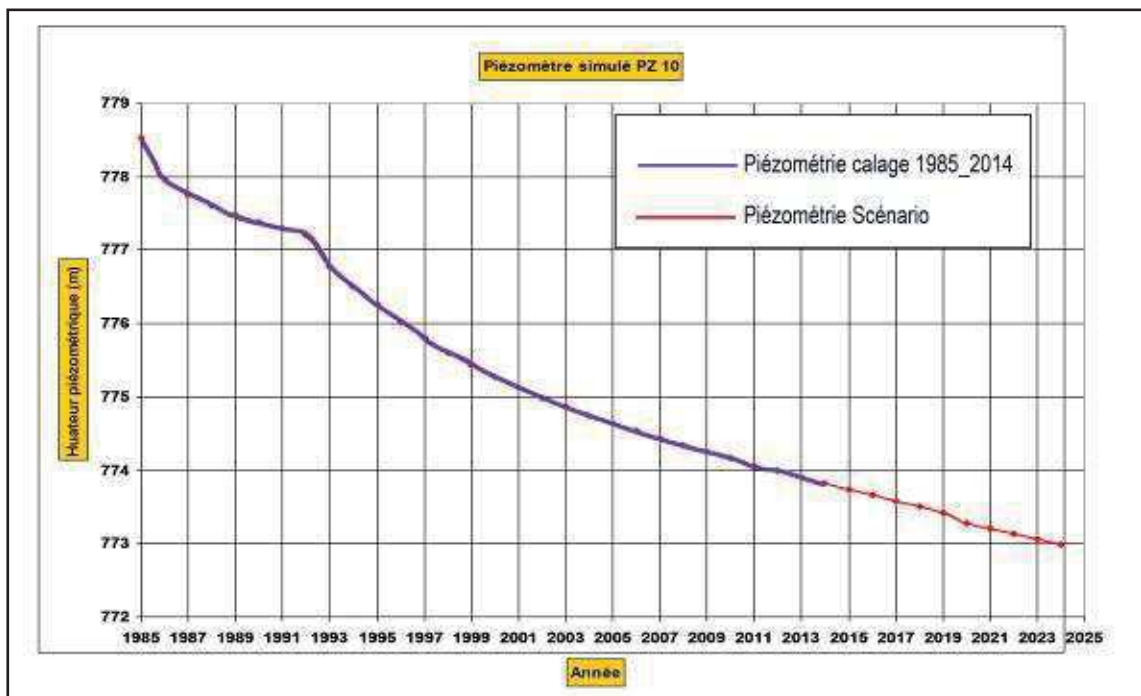


Fig.V.26 : Scénario de référence. Piézométrie simulée au piézomètre PZ10

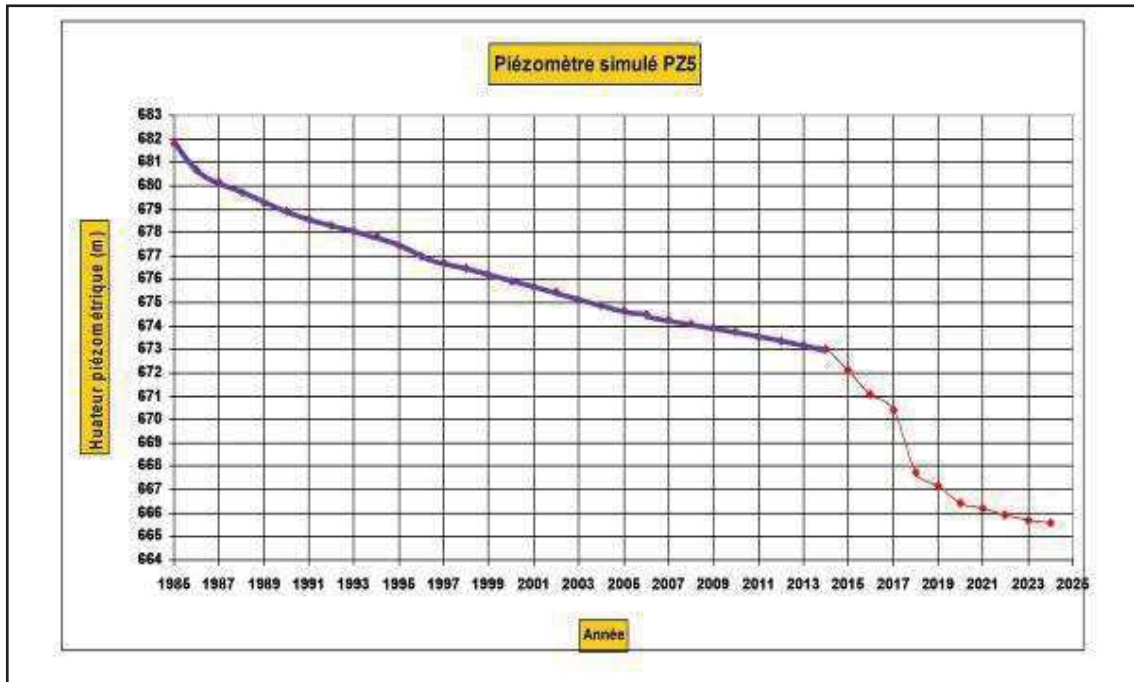


Fig.V.27: Scénario de référence. Piézométrie simulée au piézomètre PZ5

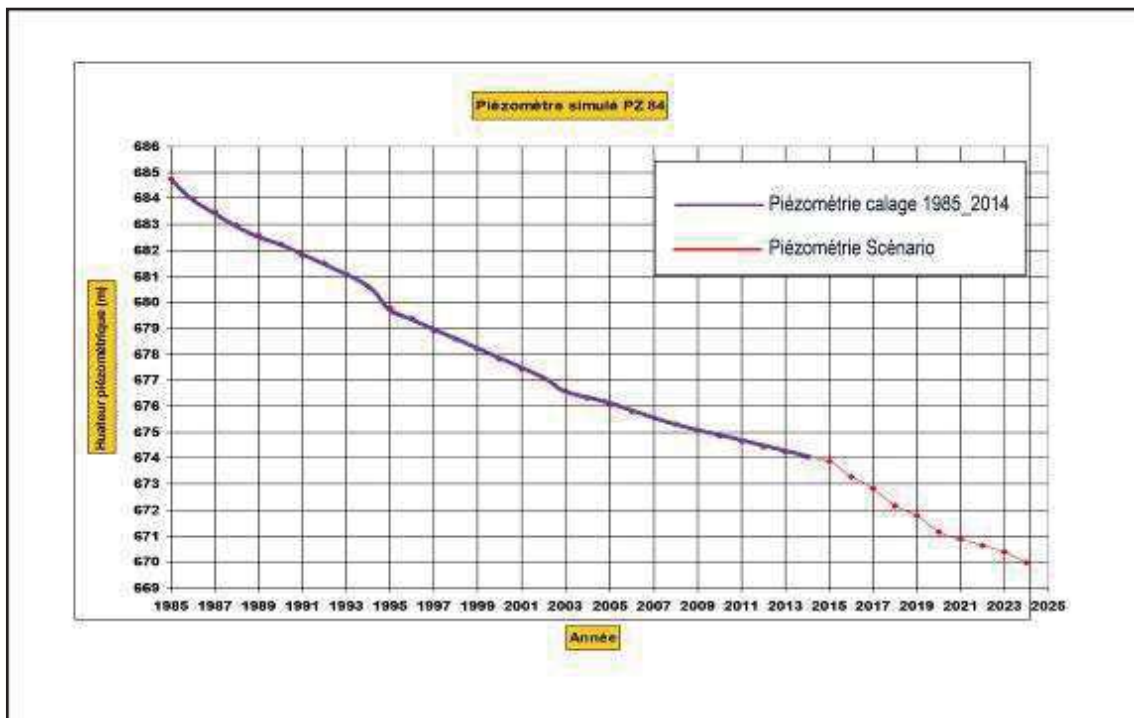


Fig.V.28 : Scénario de référence. Piézométrie simulée au piézomètre PZ84

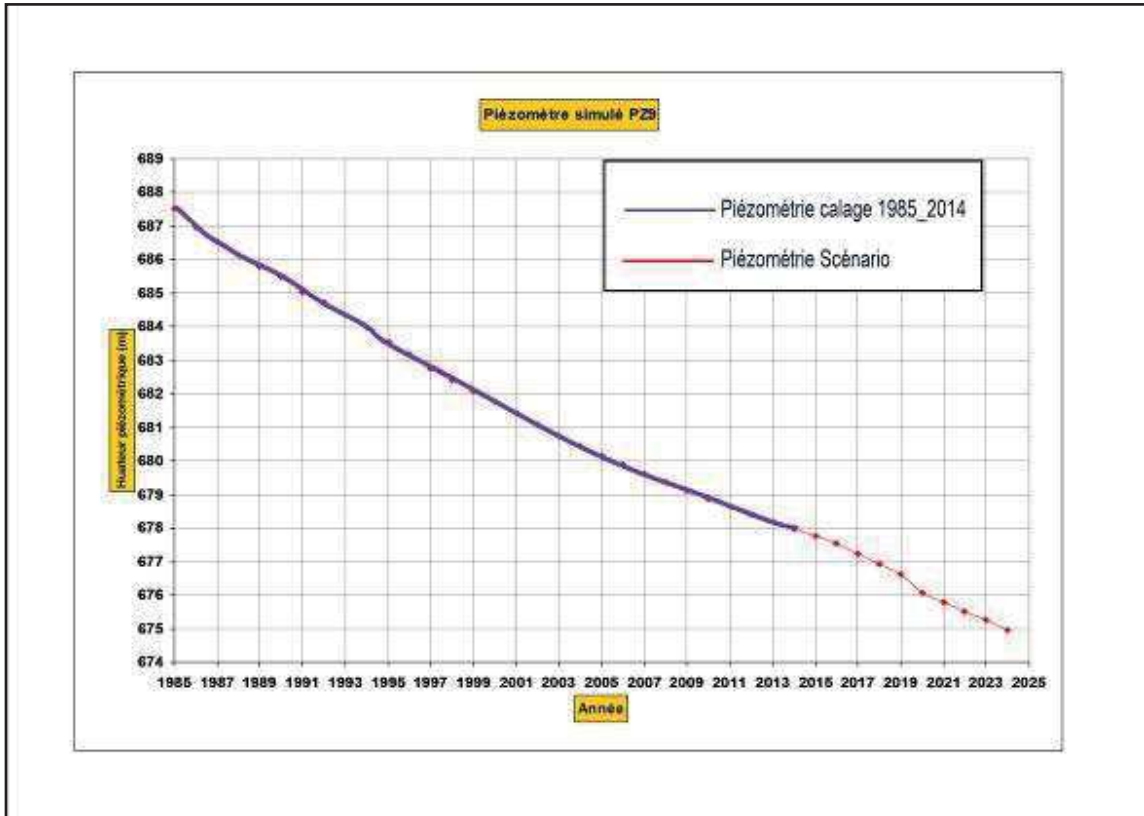


Fig.V.29 : Scénario de référence. Piézométrie simulée au piézomètre PZ29

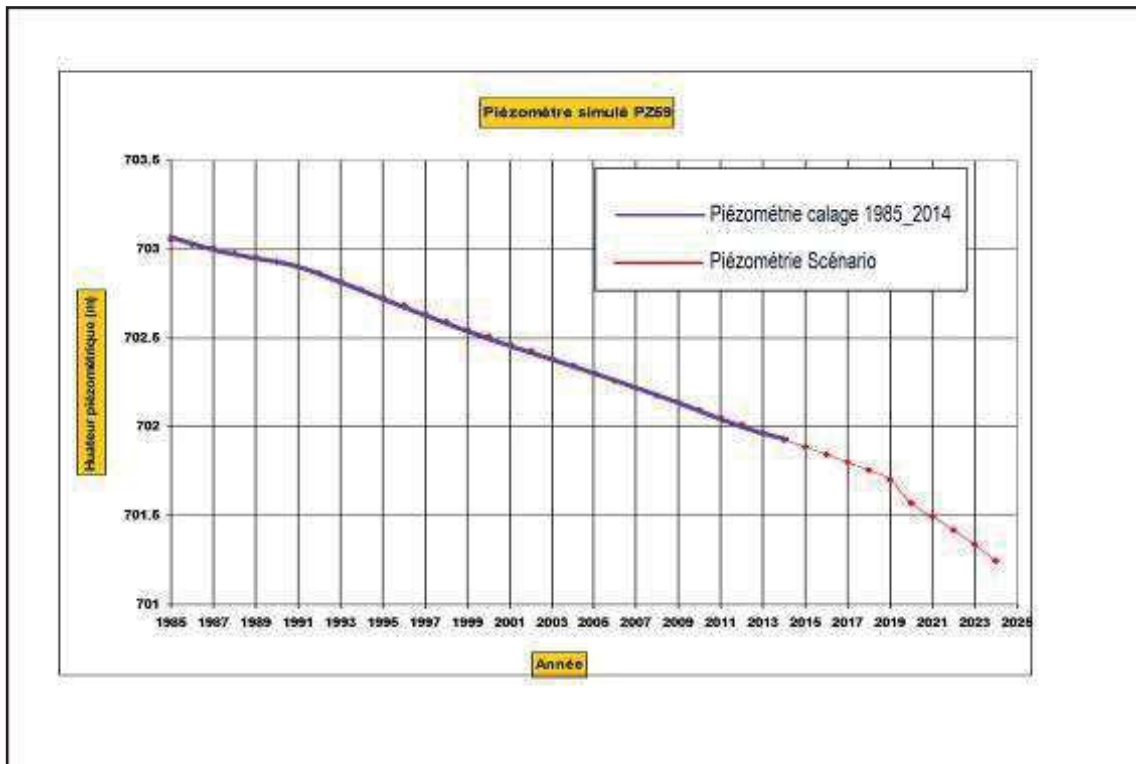


Fig.V.30 : Scénario de référence. Piézométrie simulée au piézomètre PZ59

Le maintien des conditions aux limites (prélèvements) provoque un rabattement de la nappe aquifère supérieur à 10 m. Les rabattements se localisent dans la région orientale de la plaine d'Ain Oussera (la zone de Sersou –Birine).

La variation piézométrique montre que la réaction de la nappe aquifère n'est pas identique sur l'ensemble de la zone d'étude, les rabattements enregistrés dans les piézomètres implantés dans la zone à forte exploitation sont supérieur à 10 m (PZ84 et PZ10, PZ5), par contre les rabattements enregistrés dans les piézomètres éloignés des ces zones sont très faibles, ils varient entre 0.51 et 1.81 m (PZ29 et PZ59).

➤ **Bilan hydraulique de la nappe**

Le bilan hydraulique de la nappe aquifère de l'Albien calculé par le modèle est mentionné au tableau ci-dessous.

Tableau.V.9 : Bilan de la nappe Albienne 2024

Entrés (Hm³/an)	Sorties (Hm³/an)
Frontière Sud = 18.02	Frontière Nord = 30.25
Pompages = 0	Pompages = 45.91
Infiltration = 52.298	Infiltration = 0
Alimentation par Oued Touil = 5.02	Drainage par Oued Touil = 17.88
Total IN = 75.33	Total OUT = 94.04
Bilan hydraulique	IN - OUT = -18.71

L'observation des données du bilan hydraulique de la nappe aquifère montre ce qui suit :

- Le volume de déstockage de la nappe d'eau a augmenté entre 2014 et 2024 de 90.78 Hm³/an à 94.04 Hm³/an
- Une diminution des flux sortants du flanc Nord du système de 7.87 Hm³/an soit 20.64 %.
- Diminution de volume d'eau drainé par Oued Touil de 0.22 Hm³/an soit 1.23%.

V.7.3.2. Scénario N°1

Pour le scénario N°1, les hypothèses suivantes ont été appliquées :

✓ Prélèvement :

1. La mise en service des nouveaux forages d'AEP (20 forages), le débit mobilisé est de 0.63 m³/s.
2. Irrigation constante.

✓ Recharge moyenne

Les résultats de ce scénario sont présentés ci-dessous :

➤ Evolutions piézométriques

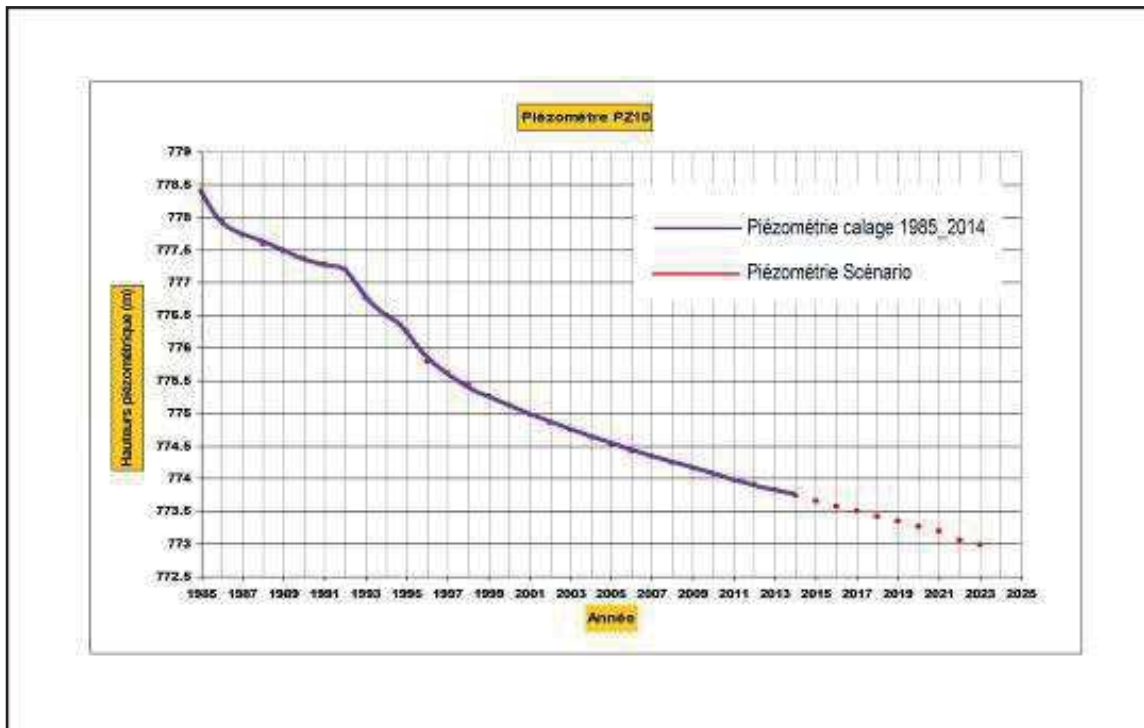


Fig.V.31: Scénario 1. Piézométrie simulée au piézomètre PZ10

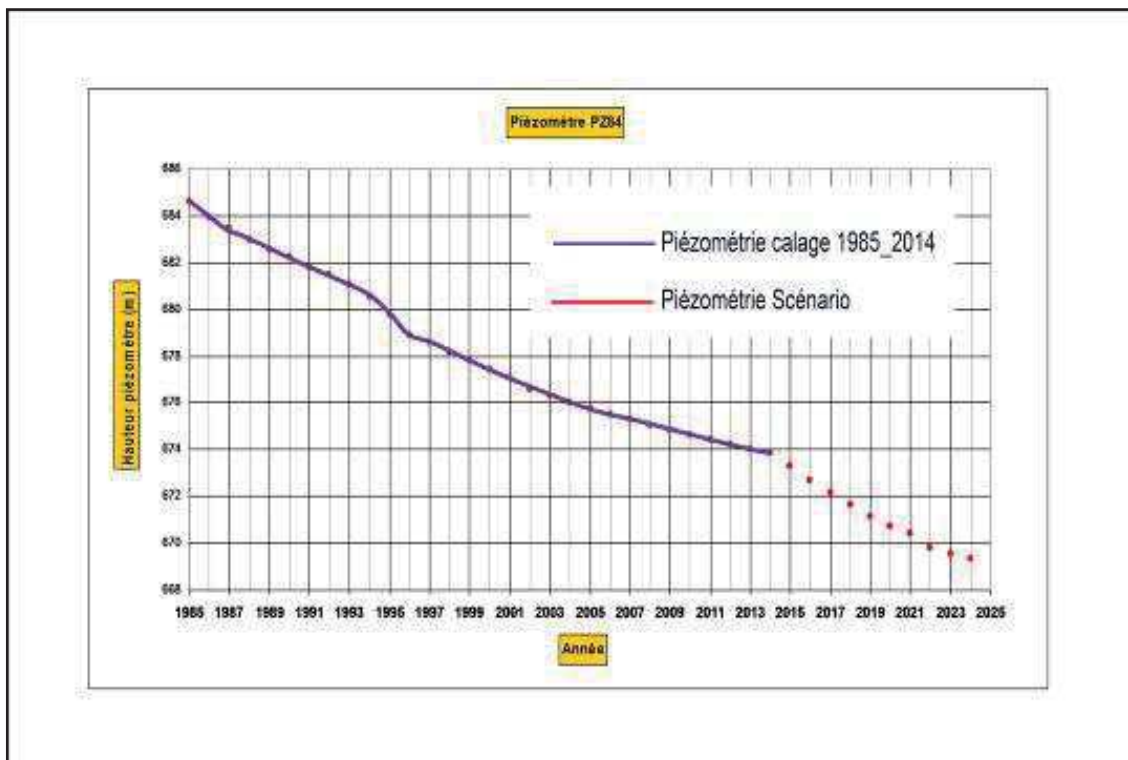


Fig.V.32: Scénario 1. Piézométrie simulée au piézomètre PZ84

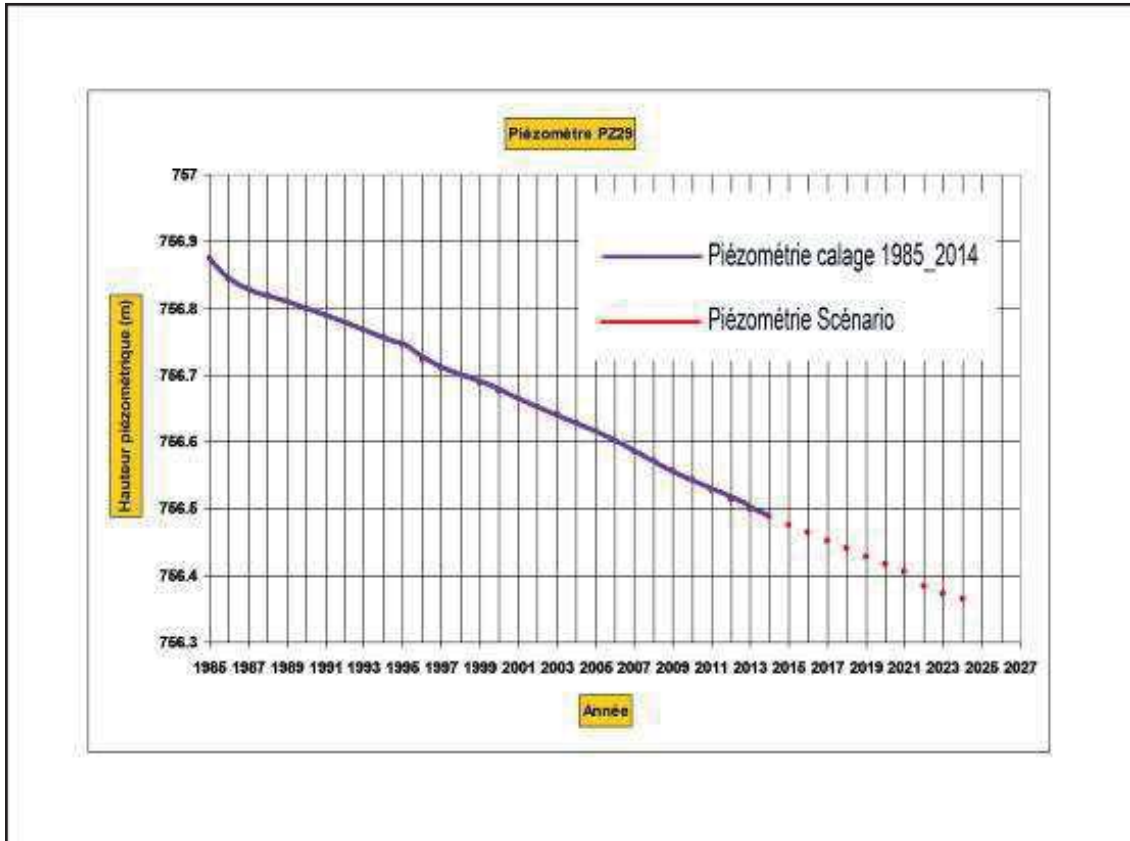


Fig.V.33: Scénario 1. Piézométrie simulée au piézomètre PZ29

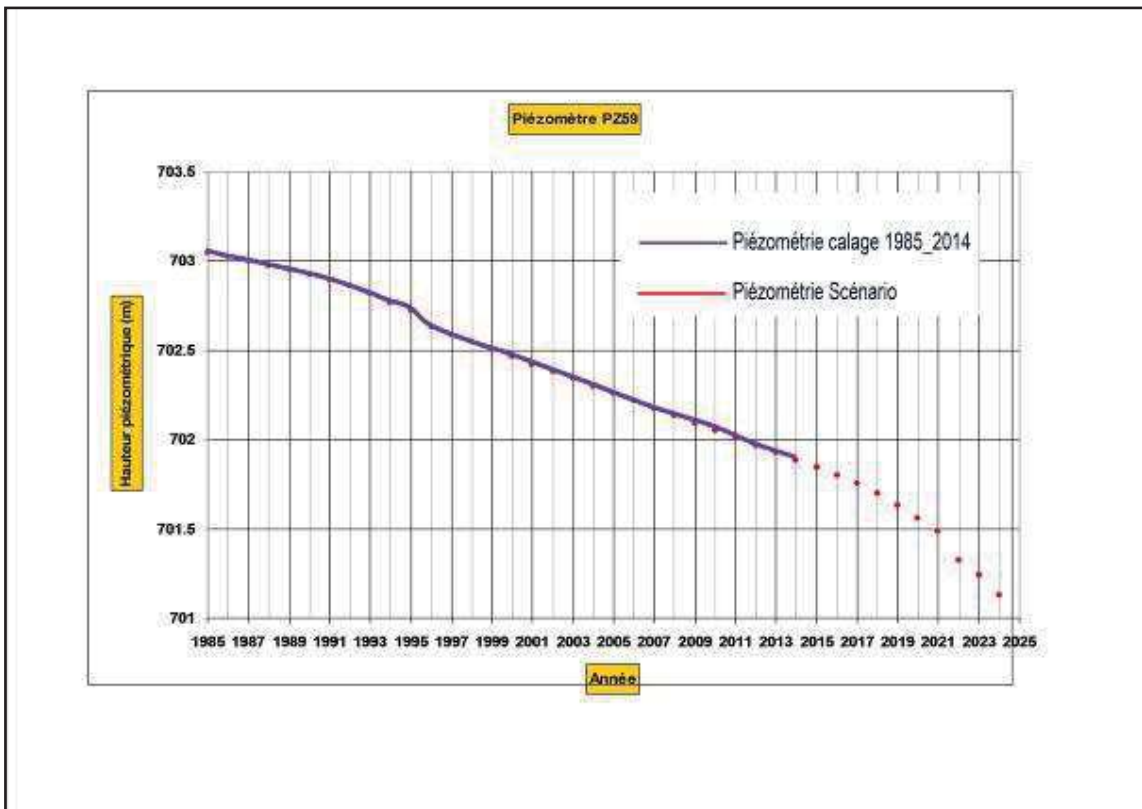


Fig.V.34: Scénario 1. Piézométrie simulée au piézomètre PZ59

➤ Carte de rabattement

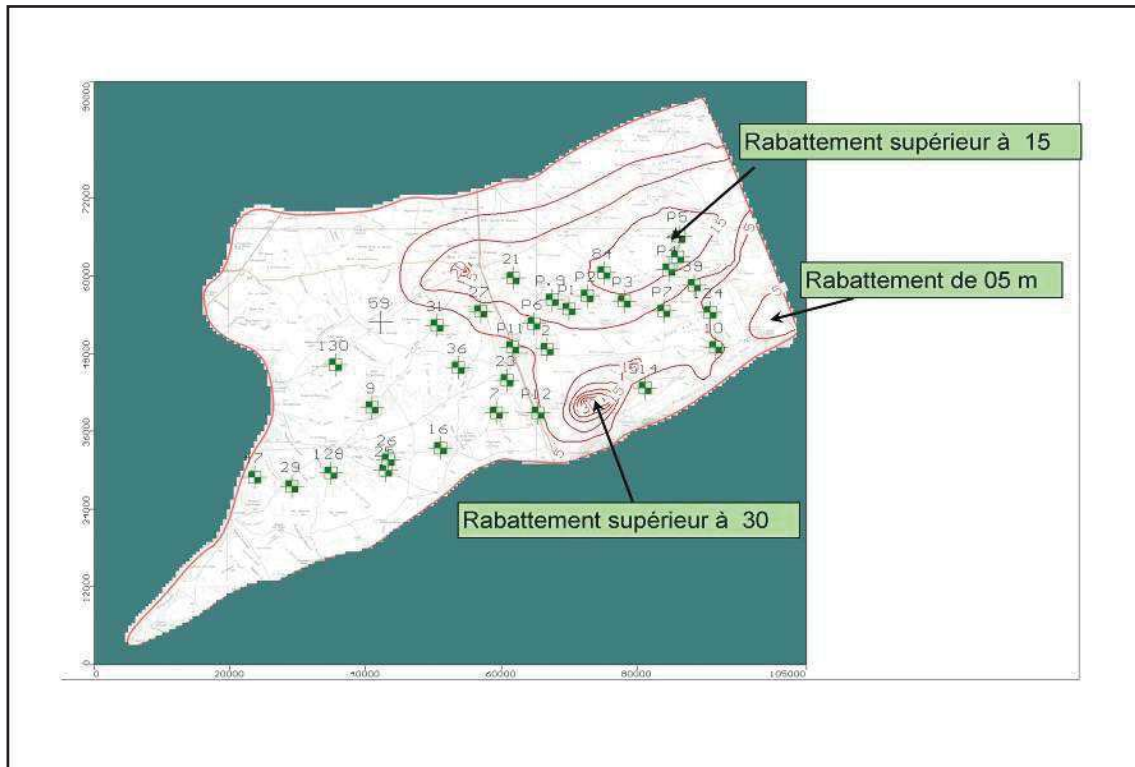


Fig.V.35: Scénario 1 -carte des rabattements de la nappe Albienne 2024

L'exploitation des nouveaux forages d'alimentation en eau potable (20 forages) a provoqué un fort rabattement de la nappe aquifère dans les zones les plus exploitées (Bouirait Lahdab et Benhar-Ain Oussera), la carte d'isorabattements dressée à partir des hauteurs piézométriques simulées, montrent que les rabattements de la nappe aquifère entre la période de 1985 et 2024 varient entre 05 à 30 m. Notons que ces données restent relatives, car ces dépressions sont généralement dû à l'interférence réciproques entre les forages (Cône de dépression) et ne sont pas des rabattements réelles dû au déstockage de la nappe aquifère par pompage. Les rabattements enregistrés dans les piézomètres entre la période 2014 et 2024 oscillent entre 0.76 m(PZ59) et 4.57 m (PZ84).

➤ **Bilan hydraulique de la nappe**

Le bilan hydraulique de la nappe aquifère de l’Albien calculé par le modèle est mentionné au tableau ci-dessous.

Tableau.V.10 : Bilan de la nappe Albienne 2024

Entrés (Hm³/an)	Sorties (Hm³/an)
Frontière Sud = 18.21	Frontière Nord = 26.56
Forage = 0	Forage = 51.27
Infiltration = 51.298	Infiltration = 0
Alimentation par Oued Touil = 5.08	Drainage par Oued Touil = 17.78
Total IN = 71.40	Total OUT = 95.61
Bilan hydraulique	IN - OUT= -24.21

Les données mentionnées au tableau ci-dessus montrent que la différence entre le volume entrant et sortant de l’aquifère, sur la période 2014 à 2024, est de -24.21 Hm³, généralement ce déficit est faible et le système aquifère reste toujours en équilibre, car les apports de la nappe peuvent compenser ce déficit.

Les éléments du bilan de la nappe aquifère de l’année 2014 et 2024 sont mentionnés au tableau ci-dessous.

Tableau.V.11 : Bilan de la nappe Albienne pour l’année 2014 et 2024

	2014	2024
Entrés (Hm ³ /an)	74.84	71.40
Sorties (Hm ³ /an)	90.78	95.61
Entrés – Sorties (Hm ³ /an)	-15.94	-24.21

V.7.3.3. Scénario N°2

Pour le scénario 2, le Direction des Services Agricoles de la wilaya de Djelfa est entrain de réaliser deux nouveaux périmètres agricoles.ces derniers seront mis en service en 2019, Il a été appliqué :

- ✓ Prélèvement constant durant les périodes 2014 et 2024.
- ✓ Mise en service des nouveaux périmètres agricoles (7000Ha), le nombre total des forages est 36 et le débit moyen mobilisé par forages est 30 l/s (Fig.V.36).
- ✓ Recharge moyenne.

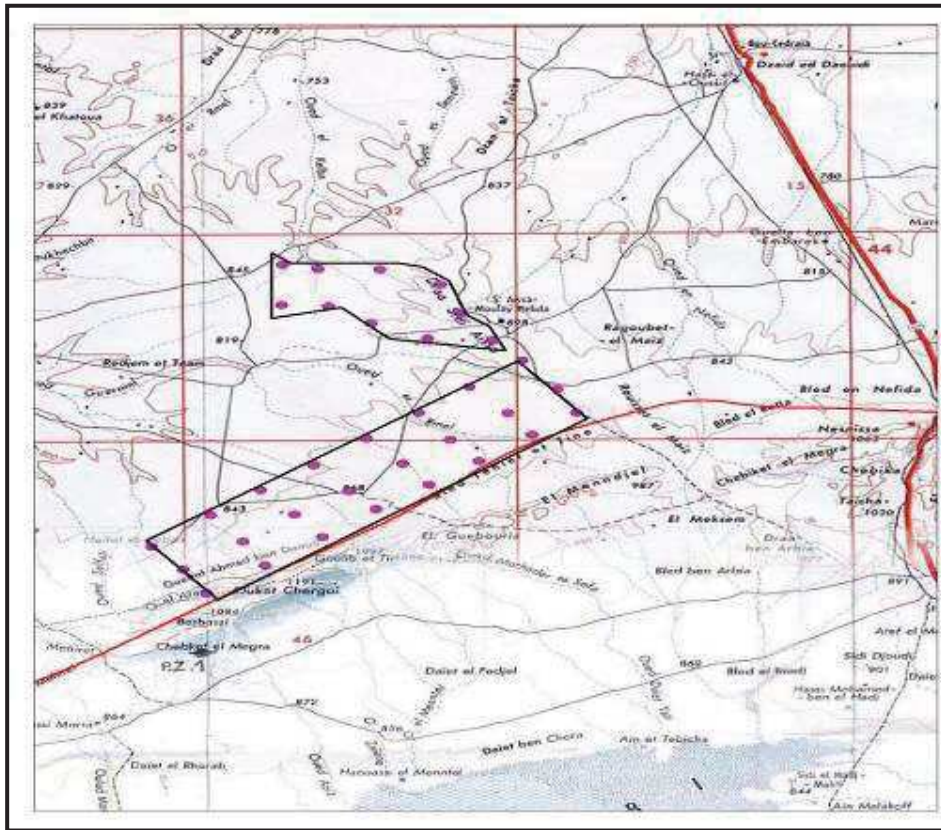


Fig.V.36: plan situation des périmètres (Oued Elkalba et Keskes)

➤ Evolutions piézométriques

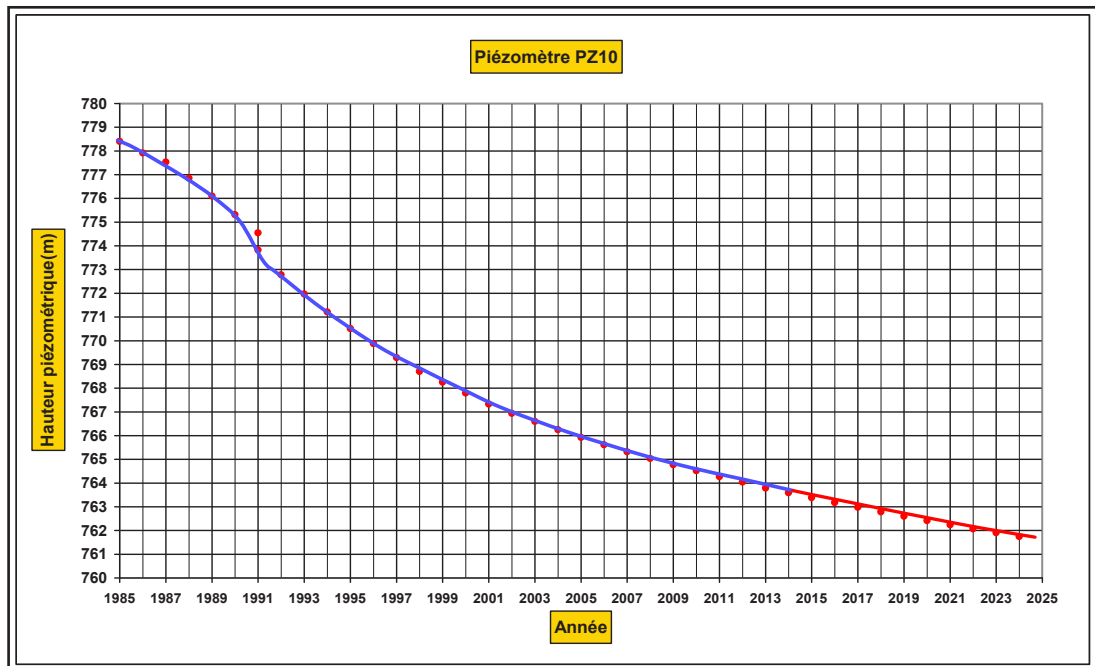


Fig.V.37: Scénario 2. Piézométrie simulée au piézomètre PZ10

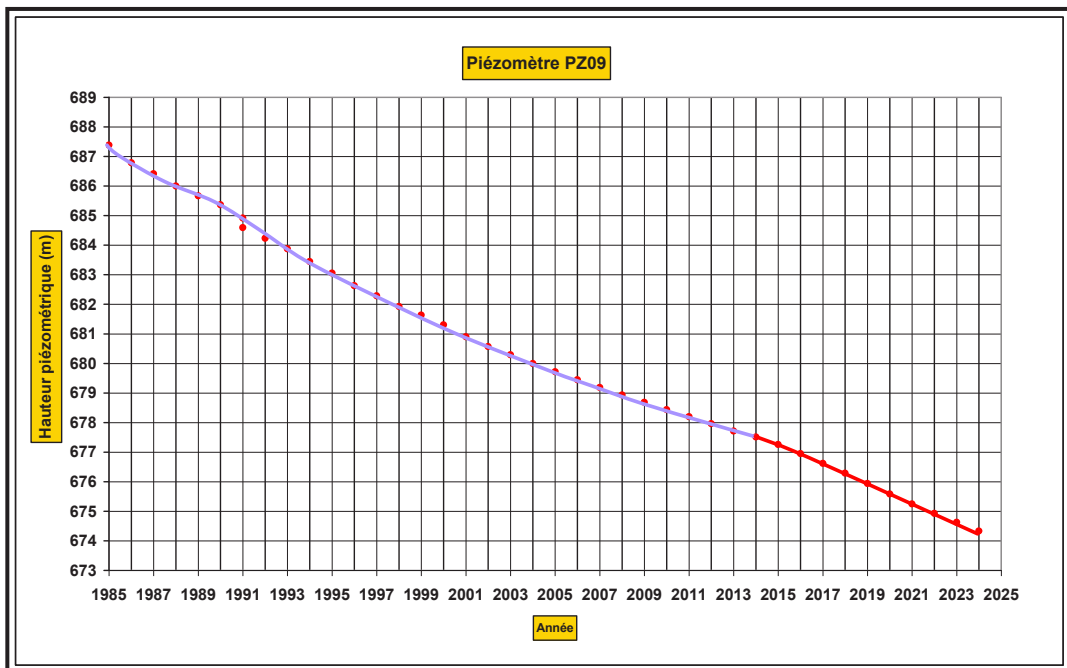


Fig.V.38: Scénario 2. Piézométrie simulée au piézomètre PZ09

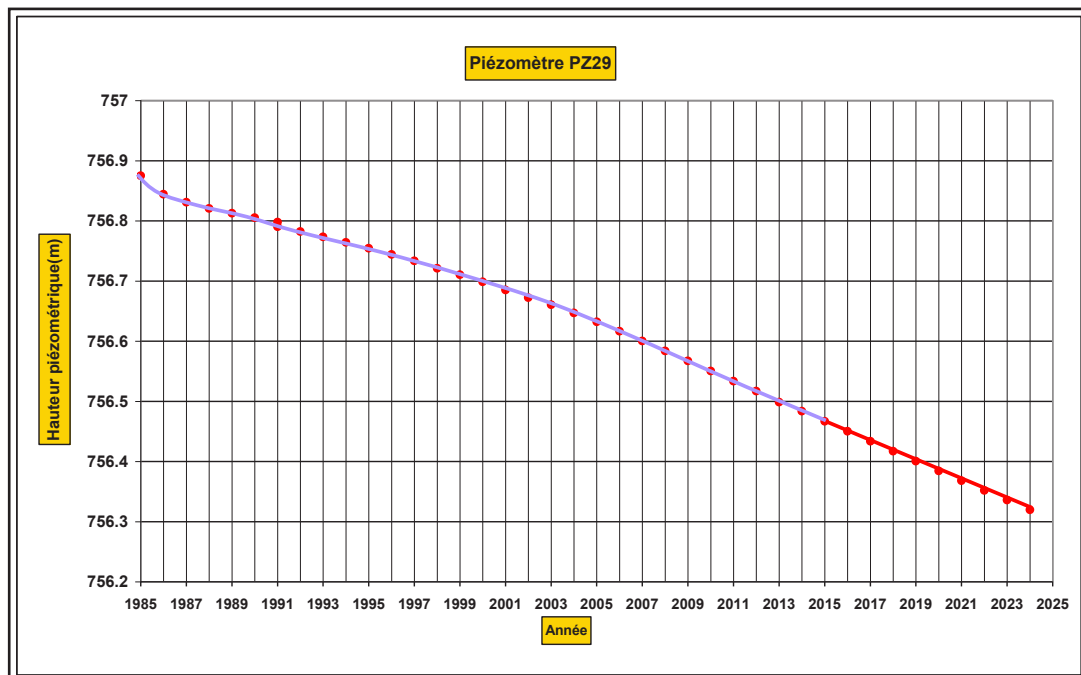


Fig.V.39: Scénario 2. Piézométrie simulée au piézomètre PZ29

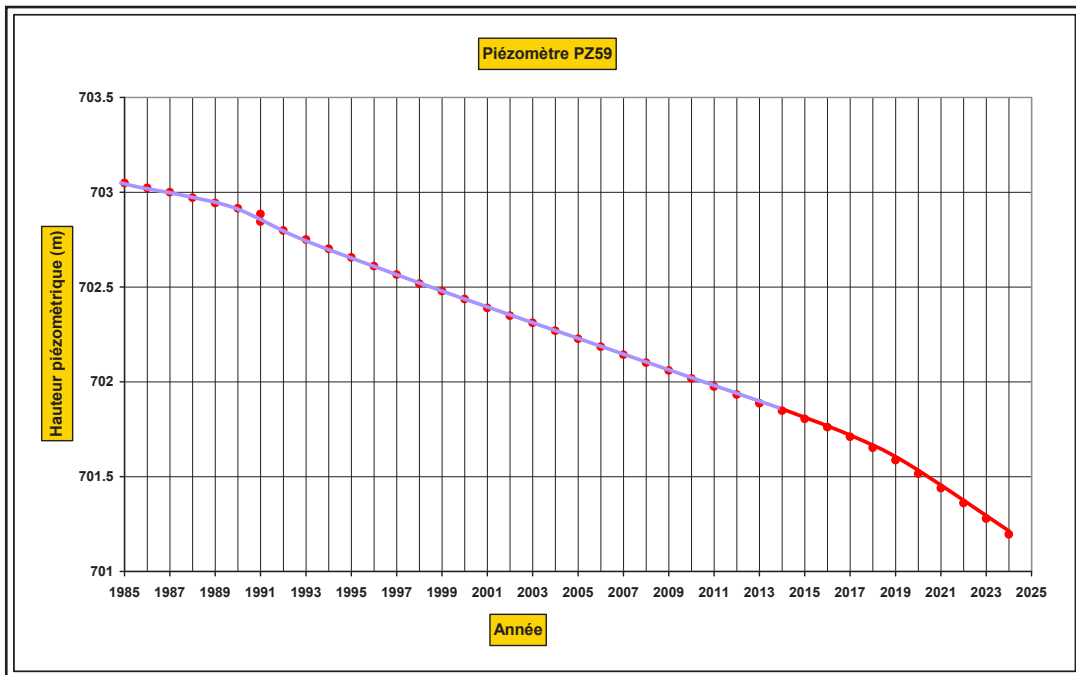


Fig.V.40: Scénario 2. Piézométrie simulée au piézomètre PZ59

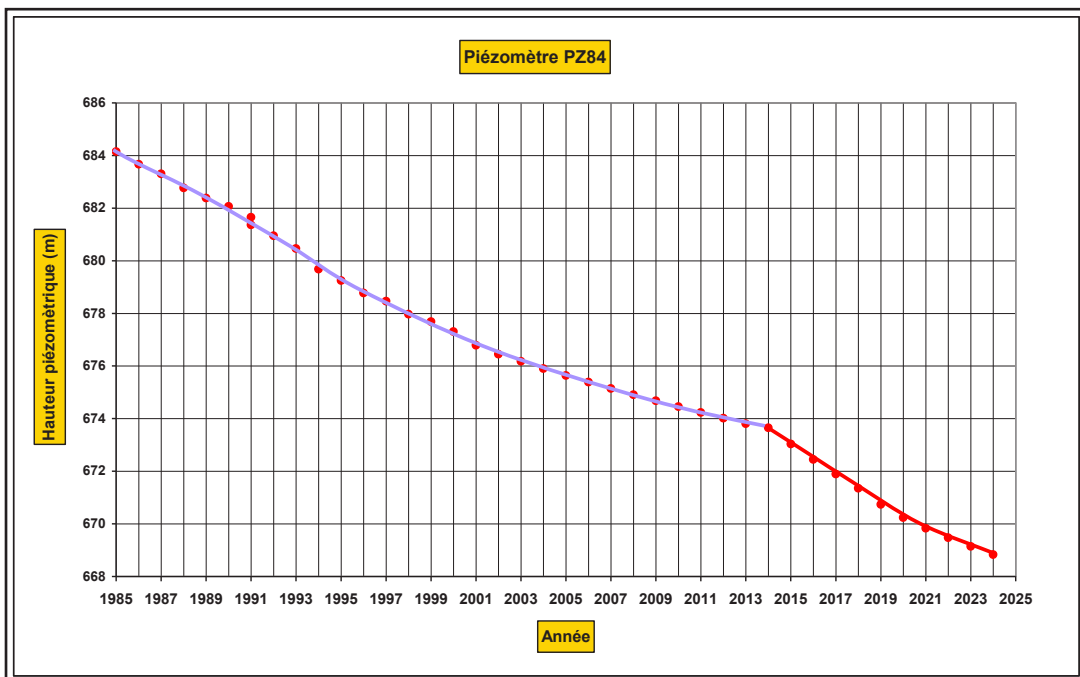


Fig.V.41: Scénario 2. Piézométrie simulée au piézomètre PZ84

Scénario N°2, Mise en service des nouveaux périmètres agricoles, les résultats de cette simulation montrent une baisse continue de la nappe aquifère jusqu'à 2024 dans les zones à forte exploitation.

Les piézomètres d'observations de la nappe ont enregistré des rabattements variés entre 1.85 m(PZ10) et 4.81m (PZ84).

Notons que les importantes dépressions de la nappe avec des rabattements plus de 10 m, sont les résultats de l'interférence réciproque entre les forages.

➤ **Bilan hydraulique de la nappe**

Le bilan hydraulique de la nappe aquifère de l'Albien calculé par le modèle est mentionné au tableau ci-dessous.

Tableau.V.11 : Bilan de la nappe Albiennaise 2024

Entrés (Hm³/an)	Sorties (Hm³/an)
Frontière Sud = 16.28	Frontière Nord = 24.52
Forage = 0	Forage = 68.30
Infiltration = 51.298	Infiltration = 0
Alimentation par Oued Touil = 3.23	Drainage par Oued Touil = 13.17
Total IN = 70.81	Total OUT = 105.99
Bilan hydraulique	IN - OUT= -35.18

Les données mentionnées au tableau ci-dessus montrent :

- La différence entre le volume entrant et sortant de l'aquifère, sur la période 2014 -2024, est de -35.18 Hm³, ce déficit constitue 49.68% de volume total d'alimentation de la nappe.
- Diminution du volume d'eau sortant de la frontière Nord du système aquifère entre l'année 2014 et 2024 de l'ordre de 14.04 Hm³ soit 35.67%, et qui revient à la baisse du niveau piézométrique dans cette zone.
- Baisse de volume d'eau drainée par Oued Touil de 4.93 Hm³.
- Diminution des apports de l'Oued Touil vers la nappe aquifère de 1.71Hm³. 34.61% et revient à l'exploitation des eaux souterraines par les forages d'irrigation dans la zone Sud-Ouest du système aquifère (périmètre d'irrigation dans la région Guernini).

Les éléments du bilan de la nappe aquifère de l'année 2014 et 2024 sont mentionnés au tableau ci-dessous.

Tableau.V.12 : Bilan de la nappe Albienne pour l'année 2014 et 2024

	2014	2024
Entrés (Hm ³ /an)	74.84	70.81
Sorties (Hm ³ /an)	90.78	105.99
Entrés – Sorties (Hm ³ /an)	-15.94	-35.18

V.8. Conclusion

Pour l'ensemble des scénarios, on remarque une baisse continue de la piézométrie de la nappe aquifère de 2014 jusqu'à 2024, et qui revient à la poursuite de surexploitation par les forages d'eaux, surtout dans le plateau de Sersou et dans la zone sud de la plaine d'Ain Oussera.

Notant que les rabattements simulés entre 2014 et 2024 restent limitées à 4.5 m, ces rabattements restent acceptables par rapport à la réserve de la nappe aquifère, mais si on continue le déstockage de cette réserve souterraine, on pourrait entraîner un dénoyage de la nappe d'eau et les rabattements seront à long terme importants.

Les simulations ont montré que l'exploitation de la nappe dans les zones d'alimentation aura des effets indésirables sur le recharge, ils proviennent des apports souterrains du système aquifère.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ces travaux ont été conduits dans le but de comprendre le fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère d'Ain Oussera, qui renferme dans son sous-sol un potentiel hydrique assez important. Ces ressources subissent aujourd'hui une exploitation progressive qui devient inquiétante. En effet, le développement des agglomérations et les activités industrielles et agricoles ainsi que l'accroissement des prélèvements ont entraîné une dégradation de la qualité des eaux, et un déséquilibre hydrodynamique des nappes aquifères (baisse hydrodynamique du niveau d'eau). Ils ont été réalisés à travers l'approche méthodologique et la modélisation afin d'exécuter le modèle de gestion des ressources en eau du système aquifère. Cela nous a permis d'aboutir à des résultats dont la synthèse est présentée ci-après.

L'étude géophysique nous a permis de mettre en évidence la géométrie de l'aquifère. Il s'agit des formations de l'Albien constituées essentiellement d'une série gréseuse ou gréso-argileuse fracturée. Cette étude montre que l'Albien est la formation aquifère la plus intéressante de la région, caractérisée par une épaisseur variée entre 83 et 225 m et une résistivité comprise entre 50 et 200 Ohm.m.

La plaine d'Ain Oussera est caractérisée par un climat semi-aride, avec un été chaud et sec et un hiver froid et humide. La précipitation moyenne est de 226,15 mm/an et la température moyenne annuelle est de 17,6°C. Pour la recharge de la nappe, nous nous sommes basés sur une recharge pluviométrique correspondant à 5,05 % de la pluviométrie totale.

L'analyse des perméabilités révèle une grande dispersion des valeurs. La répartition de ce paramètre montre qu'il existe deux classes de perméabilités. Les fortes valeurs de la perméabilité se localisent dans la zone Nord-Est (Birine –Ain oussera) et au Sud-Ouest de la plaine et varient entre 2.10^{-5} et 43.10^{-5} m/s, par contre les faibles valeurs sont enregistrées au Sud-Est et au Nord-Ouest de la zone d'étude, les valeurs sont comprises entre $0,1.10^{-5}$ et 2.10^{-5} m/s. Enfin, l'étude piézométrique a montré que l'écoulement principal de la nappe est du Sud vers le Nord. L'allure des isopièzes de la carte piézométrique a mis en évidence les zones d'alimentation souterraine de l'aquifère. Cette alimentation se fait à partir du massif de la bordure Sud du système aquifère.

Le bilan hydraulique montre que l'alimentation principale de la nappe de l'Albien se fait par l'infiltration directe des eaux de la précipitation qui constitue 68,28% du volume total d'eau entrant dans la nappe aquifère, d'où la recharge est estimée de 77,25 Hm³/an et les prélèvements sont de 94,50 Hm³/an.

Les eaux de la nappe gréseuse de l'Albien se caractérisent par une minéralisation moyenne et des faciès chimiques Chloruré et Sulfaté calcique et magnésien et Bicarbonaté calcique et magnésien. Pour l'aptitude des eaux de la nappe d'Ain Oussera à l'irrigation suivant les résultats du calcul, la qualité est admissible à médiocre, pouvant être utilisées à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés

La pénurie d'eau observée depuis plusieurs décennies a entraîné une sollicitation accrue de la nappe pour pallier au déficit quantitatif. Cette situation commence à avoir des impacts négatifs sur l'équilibre hydrodynamique de la nappe. Face à cette situation, la synthèse des données que nous avons effectuée et l'élaboration d'un modèle numérique de simulation des écoulements souterrains (Visual Modflow), qui s'appuie sur la méthode des différences finies, nous ont permis de connaître l'état actuel de la ressource d'un point de vue quantitatif et d'évaluer les risques liés à l'exploitation intensive des ressources en eau souterraine.

Les simulations numériques en régime permanent (1985) et transitoire (1985-2014) après plusieurs essais que nous avons obtenu à partir d'un calage convenable, avec un coefficient de corrélation égal à 0.98, ont permis d'affiner la distribution spatiale des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère, et d'évaluer son bilan hydrique. Au cours de cette modélisation, le bilan s'est avéré déficitaire. En effet, il a été remarqué un déstockage très important du niveau piézométrique de la nappe aquifère, lié essentiellement à une surexploitation enregistrée au niveau des forages du plateau du Sersou et au sud de Bérine, où le volume extrait constitue 46,17% de l'alimentation globale de la nappe aquifère. Les simulations ont montré également, que l'exploitation de la nappe dans les zones d'alimentation aura des effets indésirables sur la recharge du système aquifère.

L'exploitation du modèle, en réalisant deux scénarios sur une période de 10 ans (2014-2024), est considérée comme suffisante pour tester la réactivité de la nappe aquifère de l'Albien lorsqu'elle est soumise à des changements dans les conditions aux limites :

Le premier scénario, la Direction des Ressources en Eau de la wilaya de Djelfa a réalisé, entre la période 2014 et 2016, des nouveaux champs de captage pour subvenir les besoins en eaux potables de la population des communes d'Ain Feka, Had Sahary, Hassi Bahbah et Bouirait Lahdeb et la ville d'Ain Oussera dont le débit mobilisé est de 630 l/s. Ces forages sont mis en exploitation entre les périodes du 2014 au 2020,

Le second scénario, la Direction des Services Agricoles de la wilaya de Djelfa est entrain de réaliser deux nouveaux périmètres agricoles, avec une superficie totale de 8000 Ha et qui seront mis en service en 2019. Les résultats de ces simulations montrent une baisse continue du niveau piézométrique qui atteint 10 m de la nappe à l'horizon de 2024, et qui allouée à la poursuite de la surexploitation par les forages d'eaux, surtout dans le plateau de Sersou et dans la zone sud de la plaine d'Ain Oussera. Si on continue le déstockage de cette réserve souterraine, ceci pourra entrainer un dénoyage de la nappe d'eau et les rabattements seront à long terme importants.

Afin de bien gérer cette ressource stratégique, denrée rare et délicate, les actions à mener qui doivent être engagées immédiatement et impérativement sont :

- Limiter les prélèvements dans la zone du Sersou.
- Limiter la réalisation des nouveaux forages pour l'irrigation par la création des périmètres de protection.
- Améliorer le réseau de suivi de la nappe pour une meilleure estimation des débits et augmenter le nombre de piézomètres pour le bon contrôle piézométrique.
- Equiper l'oued Touil par une station hydrométrique qui va nous permettre de calculer les apports annuels des eaux de la surface.
- Equiper les piézomètres qui se localisent au sud et au nord de la plaine par des capteurs des mesures piézométriques immergés ou transmetteurs immergés qui vont servir d'enregistrer les fluctuations de la nappe, et permettront de calculer les apports d'eaux souterraines vers le système aquifère.
- Réutiliser des eaux usées épurées qui constituent une potentialité en tant que ressource en eau non conventionnelle pour l'agriculture et l'industrie.
- Protéger la nappe contre toutes sortes de pollutions.
- Elaborer un modèle hydro-dispersif établi à partir des données de terrain pour évaluer la qualité hydrochimique des eaux souterraines et simuler la propagation des polluants vers la nappe à court et à moyen terme

Un tel système pourra déclencher la création d'une plateforme de concertation entre les différents acteurs concernés par la ressource à tous les niveaux, aussi bien les exploitants que les décideurs, leur permettant de prendre des décisions éclairées en vue d'une gestion rationnelle et pérenne et durable de cette dernière.

BIBLIOGRAPHIE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abourida, A., ER-ROUANE, S., PROST, J. P., CHEHBOUNI, G. (2002).** Modélisation des ressources en eaux souterraines de la plaine du Haouz de Marrakech (Maroc). Proceedings Intern. Workshop on Water in the Mediterranean Basin. Tunisie.
- ALGEO. (1980).** Etude géoélectrique de la région d'Ain Oussera. 25 p, A.N.R.H. Djelfa.
- A.N.R.H. (1983).** Rapport d'étude hydrogéologique de la nappe d'Ain Oussera. N°83. DHYG.011. 48p. A.N.R.H. Alger.
- A.N.R.H. (2014).** Inventaire des forages et données piézométriques de la Wilaya de Djelfa. Agence Nationale des Ressource Hydraulique.Djelfa.Algérie.
- Ayad, A. (1983).** Etude hydrogéologique de la nappe d'Ain Oussera. N°83. DHYG.011. 48p. A.N.R.H. Alger.
- Ayad, A. (1984).** Note sur les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe Albienne de la plaine d'Ain Oussera. N° 84-DHYD-018. 22p. A.N.R.H. Alger.
- Azlaoui, M., Nezli, I. E., Foufou, A., Haied, N. (2017).** Hydrodynamic Modeling of the Albian Aquifer of the Plain of Ain Oussera (Semi-Arid Area, Algeria). Energy Procedia. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.076.
- Baba-hamed. K., Bouanani. A., Terfous. A., Bekkouche. A. (2005).** Modèle transitoire de la nappe des alluvions de la plaine d Hennaya (Tlemcen, NWAlgérie). Journal International de l Eau et de l Environnement. Ecole. Nat. Sup.de l Hydraulique.pp,7-17.
- Baba-hamed, K (2007).** Hydrodynamique et modélisation d une nappe alluviale, validation par l'approche géostatistique Application a la nappe de la plaine de Maghnia .Thèse. Doct Etat. Univ. Abou bekr Belkaïd.Tlemcen. Algérie. 161 p.
- Banton, O., Bangoy, L. (1999).** Hydrogeologie: multiscience environnementale des eaux souterraines [Hydrogeology: environmental multidisciplinary study of groundwater]. Presse de l'Université du Québec, AUPELF-UREF, Sainte-Foy, QB.
- Bechtel. (1977).** Rapport d'étude de l'aérodrome d'Ain Oussera. A.N.R.H. Alger.
- Bredehoeft, J. D. (2002).** The water budget myth revisited: why hydrogeologists model. Groundwater, 40(4), 340-345.

Caratini, C. (1970). Etude géologique de la région de Chellala-Reibell. Publ. Serv. Carte géol. Algérie, Alger, sér.n°40, 2 vol., pp. 1-311.

Castany, G., Margat, J. (1977). Dictionnaire français d" hydrogéologie.

Castany, G. (1979). Principes et méthodes de l'hydrogéologie, Dunod université Bordas, Paris, 238p.

Castany, G. (1982). Principes et méthodes de l" hydrogéologie. Bordas.

CRAMPON, N. (2003). La pénurie d'eau annoncée. Constat, causes, conséquences et recherche de solutions. Univ. Artois. Lille. France. 27p.

Dassargues, A. (1991). Modèles mathématiques en hydrogéologie et paramétrisation. Annales de la Société géologique de Belgique, 113(2), 217-229.

Dassargues, A. (1995). Modèles mathématiques en hydrogéologie, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6,126 page.

Derouane, J., Dakouré, D. (2006). Etude hydrogéologique et modélisation mathématique du système aquifère du bassin sédimentaire de Taoudénni au Burkina Faso. In International Symposium Darcy. 30 mai-1juin. Dijon.France.19p.

DPAT. (2014). Monographie de la Wilaya de Djelfa. Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire, 375 p.

Dong, Y., Li, G., Xu, H. (2012). An areal recharge and discharge simulating method for MODFLOW. Computers & geosciences, 42, 203-205.

Durand Delga, M. (1969). Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie. Publ. Serv. Carte géol. Algérie, NS. Bull. soc. Géol. fr.,(7), xiii, 328-337.

El mansouri, B., Carlier, E ., Crampon, N. (1991). Les modèles mathématiques : outils de gestion des systèmes aquifères. Application à la nappe de la plaine de Berrechid (Maroc). VIIème Congrè Mondial des Ressources en eau. Rabat,Maroc.

El mansouri, B. (1993). Structure et modélisation quantitative de l aquifère de Berrechid (Maroc). Validation par l approche géostatistique. Thèse Doct. Univ. Lille. 231p.

Ertürk, A., Ekdal, A., Gürel, M., Karakaya, N., Guzel, C., & Gönenç, E. (2014). Evaluating the impact of climate change on groundwater resources in a small Mediterranean watershed. Science of the Total Environment, 499, 437-447.

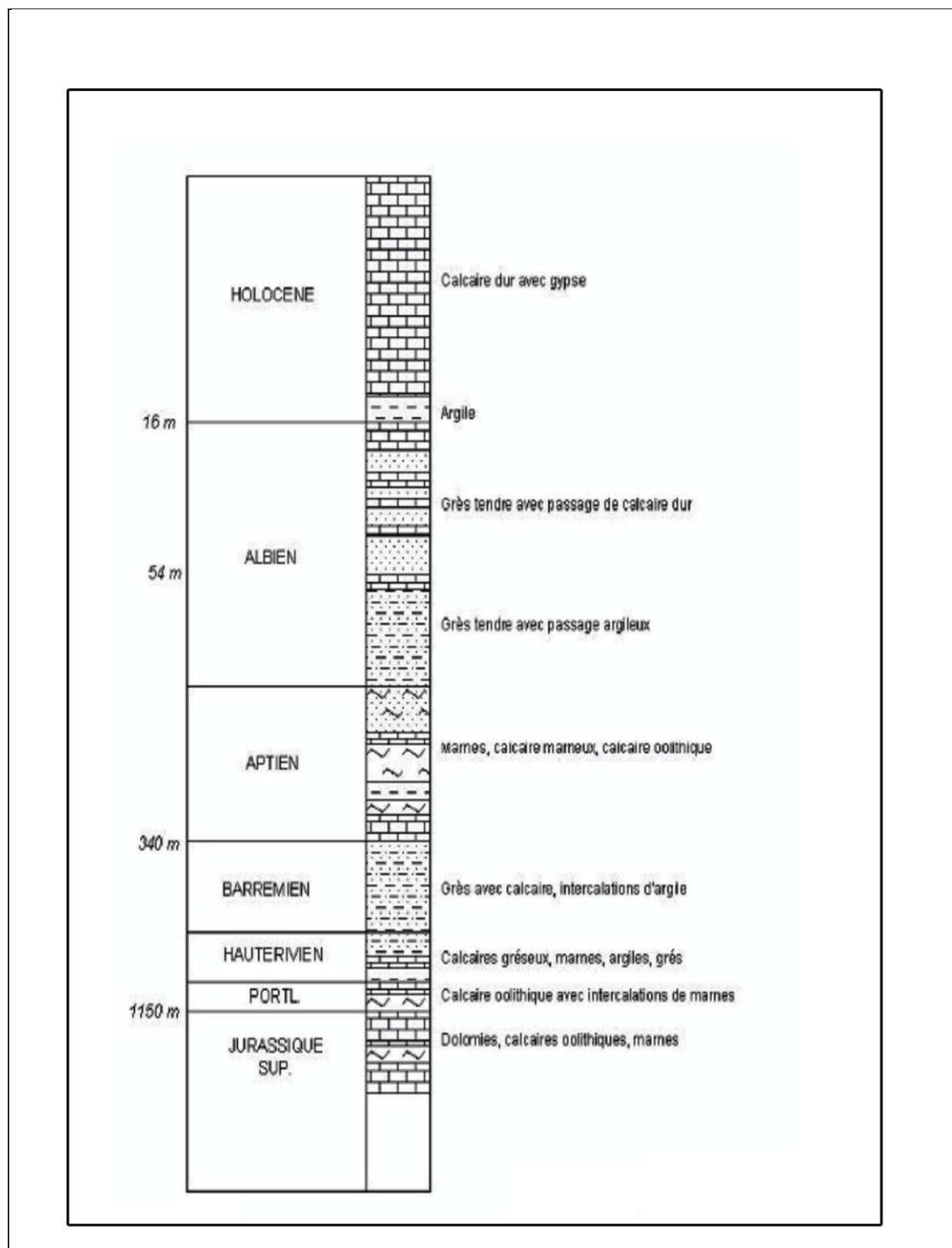
- Flandrin, J., Aymé, A. (1951).** Carte géologique de l'Algérie du Nord au 1/500 000. Service de la carte géologique.
- Flipo, N., Even, S., Poulin, M., Tusseau-Vuillemin, M. H., Améziane, T., & Dauta, A. (2003).** A distributed benthic biofilm model: dynamical biogeochemical functioning at the river scale (the grand morin, france). *Ecol. Model.*
- Gaaloul, N. (2001).** Méthodologie des modèles de simulation en hydrologie et gestion des ressources en eau. In First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers Monitoring, Modeling, and Management. Essaouira, Morocco. April 23-25. 10p.
- Gouaidia, A. (2008).** Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres Physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi aride, cas de la nappe de Meskiana- Nord Est algérien. Thèse de Doctorat. Université d'Annaba. 199p.
- Gilli, E., Mangan, C., Mudry, J. (2008).** Hydrogéologie: objet, méthodes, applications. Dunod. 339 P.
- Hani, A. (2003).** Analyse méthodologique de la structure et des processus anthropiques: Application aux ressources en eau d'un bassin côtier méditerranéen. Th. de Doct. D'état de l'Univ d'Annaba. 209p
- Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C., McDonald, M. G. (2000).** MODFLOW- 2000, The U. S. Geological Survey Modular Ground-Water Model-User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process. Open-file Report. U. S. Geological Survey, (92), 134.
- Lautz, L. K., Siegel, D. I. (2006).** Modeling surface and ground water mixing in the hyporheic zone using MODFLOW and MT3D. *Advances in Water Resources*, 29(11), 1618-1633.
- Ledoux, E. (1989).** Modèle mathématique en hydrogéologie (Rapport de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Ledoux, E. (2003).** Modèle mathématique en hydrogéologie, Ecole nationale supérieure des mines de paris, 133 pages.
- Maoui, A., Kherici, N., Derradji, F. (2010).** Hydrochemistry of an Albian sandstone aquifer in a semi arid area, Ain Oussera, Algeria. *Environ Earth Sci.* doi:10.1007/s12665-009-0207-1.
- Marsily, G. de. (1981).** Hydrogéologie quantitative. Collection Sciences de la Terre. Ed. Masson. 215p.

- Marsily, G. de. (1994).** Hydrogéologie: Comprendre et estimer les écoulements souterrains et le transport de polluants. Ecole des mines de Paris. 224p.
- Margat, J. (2000).** L'eau: matière première stratégique du XXIème siècle. GEOLOGUES-PARIS-, 13-18.
- Massuel, S. (2001).** Modélisation hydrodynamique de la nappe phréatique quaternaire du bassin du lac Tchad. DEA, Univ. Montpellier II/Univ. D'Avignon et des pays du Vaucluse.
- Mania, J. (1978).** Gestion des systèmes aquifères: application au Nord de la France (Vol. 15). SGN.
- McDonald, M. G., Harbaugh, A. W. (1988).** A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model.
- Mebrouk, N. (1994).** Contribution to hydrogeological study of the Ain Oussera Plain (High plains), engineering thesis. Oran Es senia University, Algeria. 296p.
- Mebrouk, N., Blavoux, B., Issadi, A., Marc, V. (2007).** Geochemical and Isotopic characterization of High-Mg groundwaters in Endorheic basin, Ain oussera Algeria. J Environ Hydrol 15:26.
- Mudry, J., Andreo, B., Charmoille, A., Liñán, C., Carrasco, F. (2008).** Some applications of geochemical and isotopic techniques to hydrogeology of the caves after research in two sites (Nerja Cave-S Spain and Fourbanne system-French Jura). International Journal of Speleology, 37(1), 6.
- Neuman, S.P., Witherspoon, P.A. (1974).** Finite element method in hydrogeology. Bull. BRGM, 2, III (4), pp 1-82.
- O.N.S. (2008).** Office National des Statistiques Quelques statistiques et indicateurs sociaux. Données 2007–2008.
- Pinder, G. F., Celia, M. A. (2006).** Subsurface hydrology. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience.
- Richards, L. A. (1954).** Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. US Department of Agriculture Handbook 60, Washington, DC, p 159
- Rouabhia, A. (2006).** Vulnérabilité et risques de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables Miocènes de la plaine d'El MA El Abiod Nord-Est Algérien. Thèse de doctorat. Université d'Annaba. 197p.

- Rodier, J. (2009).** L'analyse de l'eau: Eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer, 9e édition, Dunod, Paris.
- Sari, A. (2002).** Initiation à l'hydrologie de surface. Algérie, Editions Houma.
- Schoeller, H. (1962).** Les eaux souterraines: hydrologie dynamique et chimique, recherche, exploitation et évaluation des ressources.
- STROJEXPORT PRAGUE. (1976).** Rapport d'étude Géophysique de la Région Ain Oussera - Ain El Hadjel
- Thorntwaite, C. W. (1948).** An approach toward a rational classification of climate. Geographical review, 38(1), 55-94.
- Touaibia, B. (2004).** Manuel pratique d'hydrologie .Achevé d'imprimer dans les presses Madani Frères Guerrouaou.Blida.
- Turc, L. (1961).** Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule simplifiée et mise à jour. Ann Agron (12), 13-49.
- Vengosh, A. (2003).** Salinization and saline environments. Treatise on geochemistry, Volume 9. Editor: Barbara Sherwood Lollar. Elsevier, p.333-365.
- Wang, H., Anderson, M. P. (1982).** Introduction to groundwater modeling: finite difference and finite element methods. Series of books in geology. San Francisco: W.H. Freeman.
- Wang, H. F., Anderson, M. P. (1995).** Introduction to groundwater modeling: finite difference and finite element methods. Academic Press.
- Woldeamlak, S. T., Batelaan, O., & De Smedt, F. (2007).** Effects of climate change on the groundwater system in the Grote-Nete catchment, Belgium. Hydrogeology Journal, 15(5), 891-901.

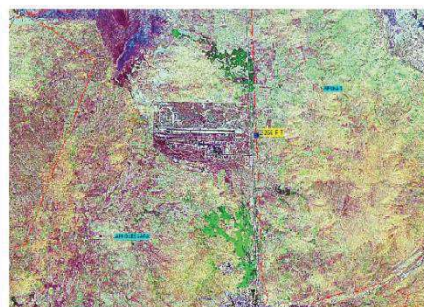
ANNEXES

Annexe I : Log litho-stratigraphiques du forage Bou Cedraïa (ANRH)



Annexe II : Log litho-stratigraphiques du forage El Khrachem (ANRH)

Opération Sondage de reconnaissance géologique profond el krachem	
Nom du forage El Krachem	Carte Boghar N°24 - 1/200.000
N° fichier du forage 266 - F7	X : 518700
Wilaya Djelfa	Y : 247600
Commune Ain ouessera	Z : 648 m
Lieu Dit El krachem	Prof (m): 1077



Prof (m)	Symbol	Lithologie	Etage	Coupe Technique	Observation
0		Argile sableuse et grés gossier	QT		Forage Krachen : 266 -F7:
25		Argie + - sableuse et grés	Moicène Inf		1/Profndeur de la nappe:
50					570 -574 m
75					NP =657 m
100					Q =0.038 l/s
125		Calcaire récifaux			dh =95°F
150					RS =3.064 g/l
175					2/ Profndeur de la nappe:
200		Marne ognons , calacire + - sableuse			964 -970 m
225		Marne feuilletée			NP =681.4 m
250					Q =0.125 l/s
275		Alternance de calcaire récifaux et de marne à rognons cacalcaires	Campagnien		3/Profndeur de la nappe:
300					1022 -1026 m
325					NP =689.5 m
350					Q =6.5l/s
375					T°C = 45,5
400					dh = 37°F
425					RS =2.183 g/l
450		Calcaire oolithique et marno - calcaire , marno compact et feuilletée	Santonien		4/Profndeur de la nappe:
475					1022 -10764 m
500		Marne calcaire noire	Caniacien		NP =689.5 m
525					Q =12 l/s
550		Alternance marne grise, marno - calcaire et calcaire	Turonien		T°C = 45,5
575					dh = 70°F
600					RS =2.286 g/l
625		Calcaire marneux et marno - calcaire			Qualité chimique :
650					Prélèvement 28/03/1959
675		Mame grise compact, calcaire cristallin et marno - calcaire			RS = 2.223 g/l
700					dh =70 °F
725		Alternance de calcaire grossier et de marne gise	Cenomanien		Prélèvement 22/04/1959
750					RS = 2.191/l
775		Mame et calcaire en rgnons			dh =65 °F
800					
825		Alternance de calcaire grossier et de marne gise	Albien		
850					
875		Grés tendre et sable			
900					
925					
950					
975					
1000					
1025					
1050					
1075					
1100					

Date début des travaux : 04/12/1950

Entreprise de réalisation :

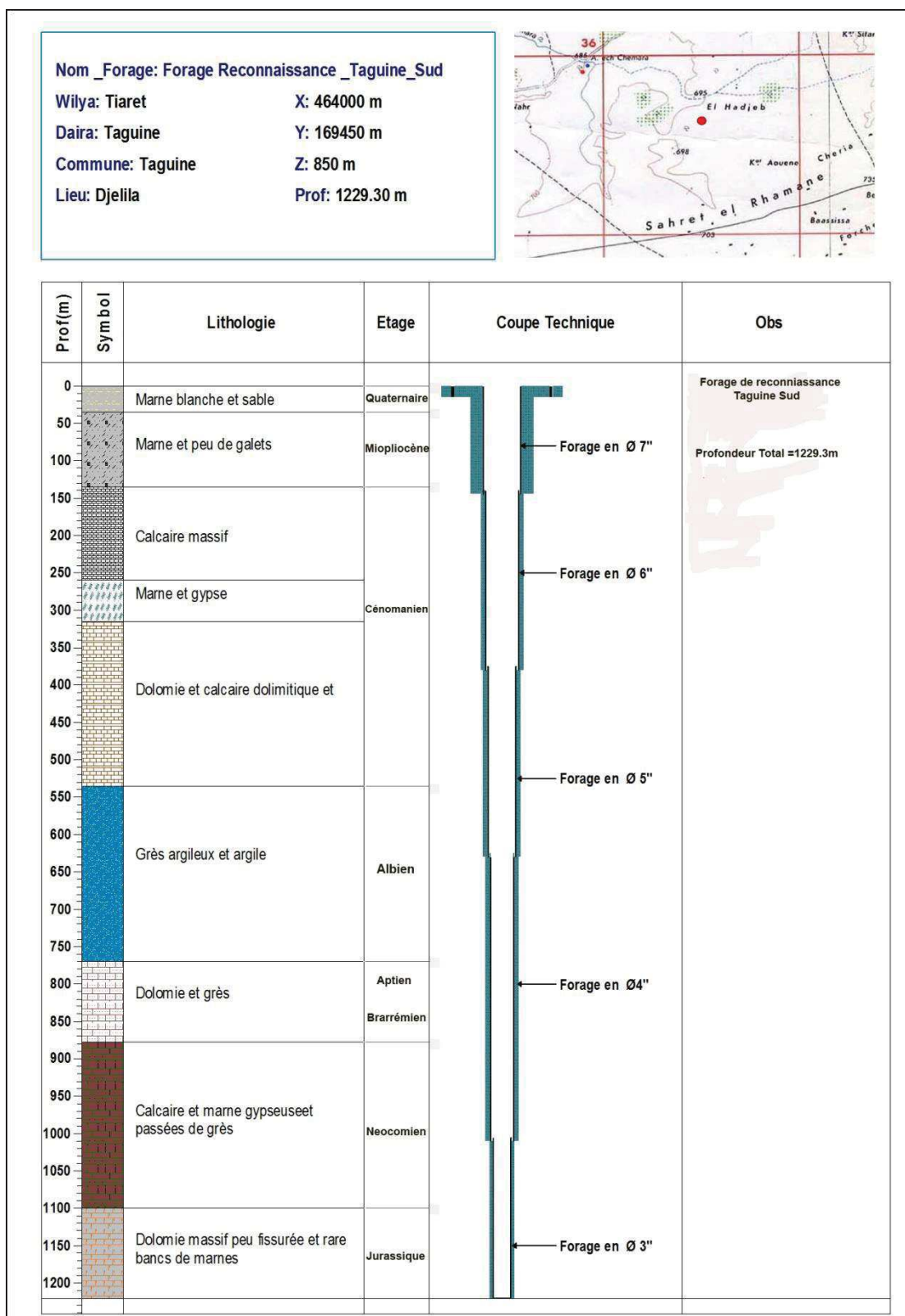
Maitre d'oeuvre :

Date fin des travaux : 11/07/1951

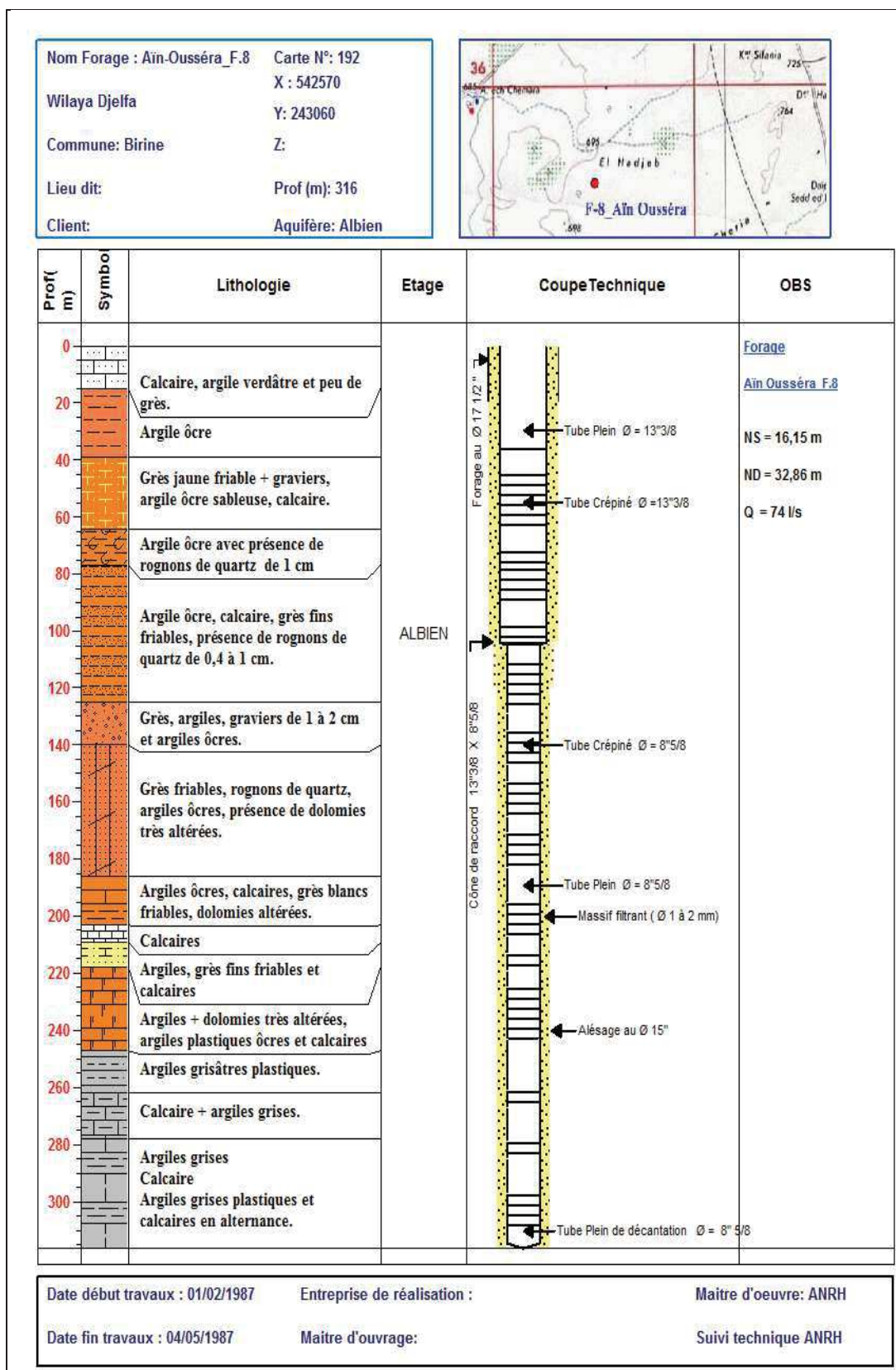
Maitre d'ouvrage :

Suivi technique : G.Cheyron

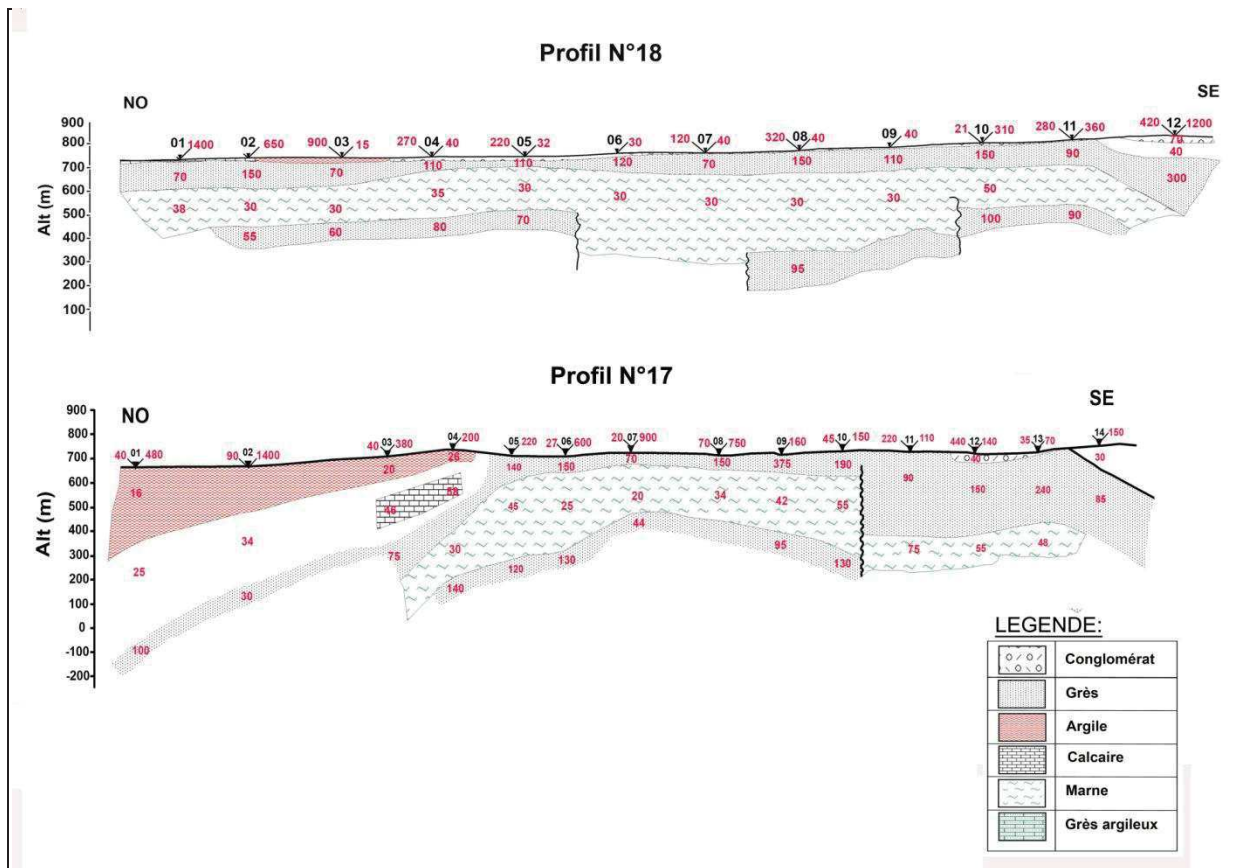
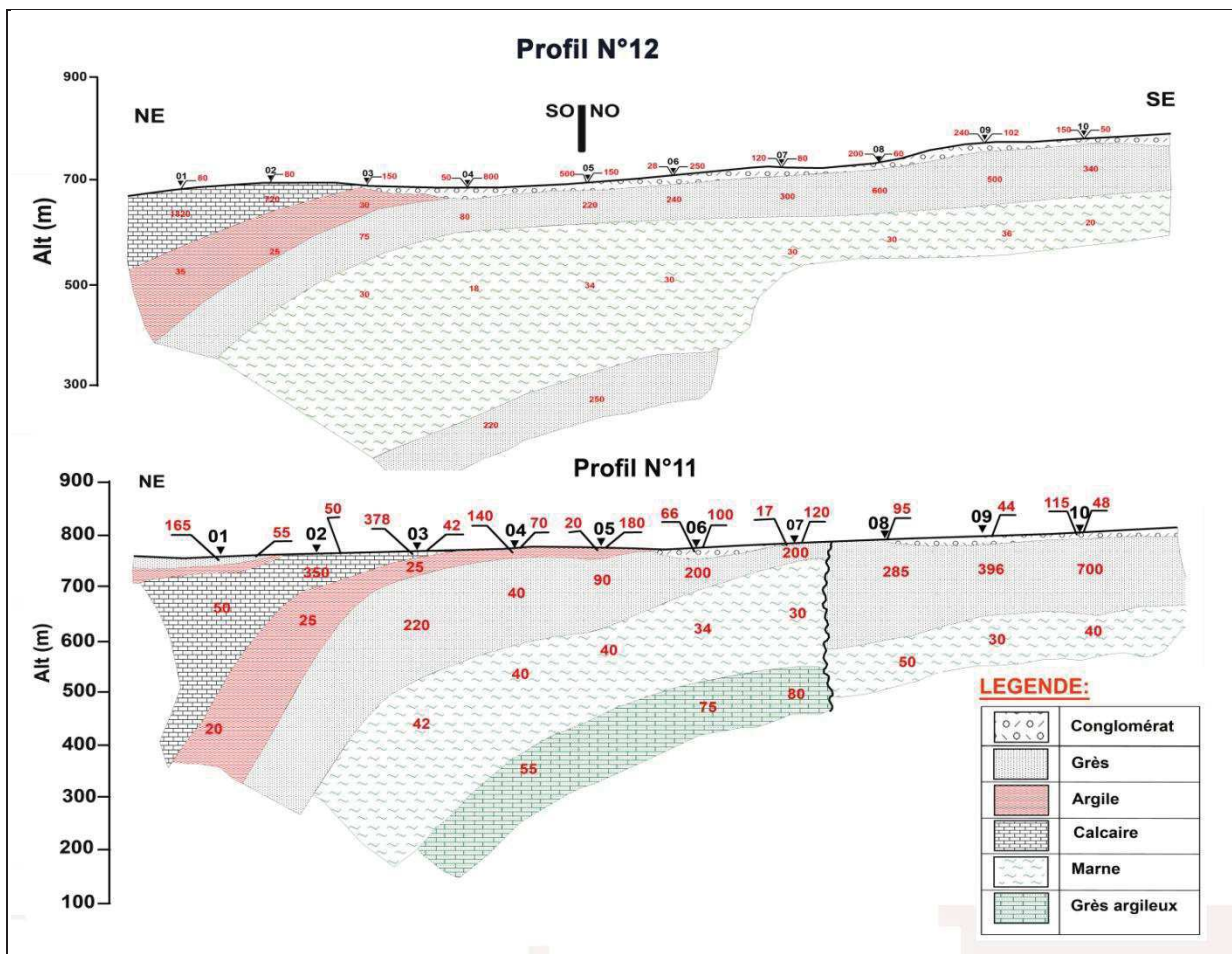
Annexe III : Log litho-stratigraphiques du forage Taguine-Sud (ANRH)



Annexe IV : Log litho-stratigraphique du forage F8 Ain Oussera (ANRH)



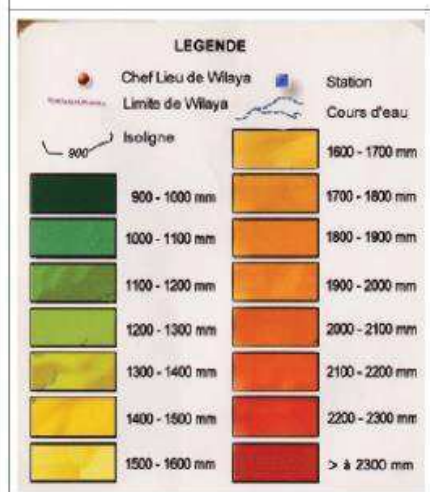
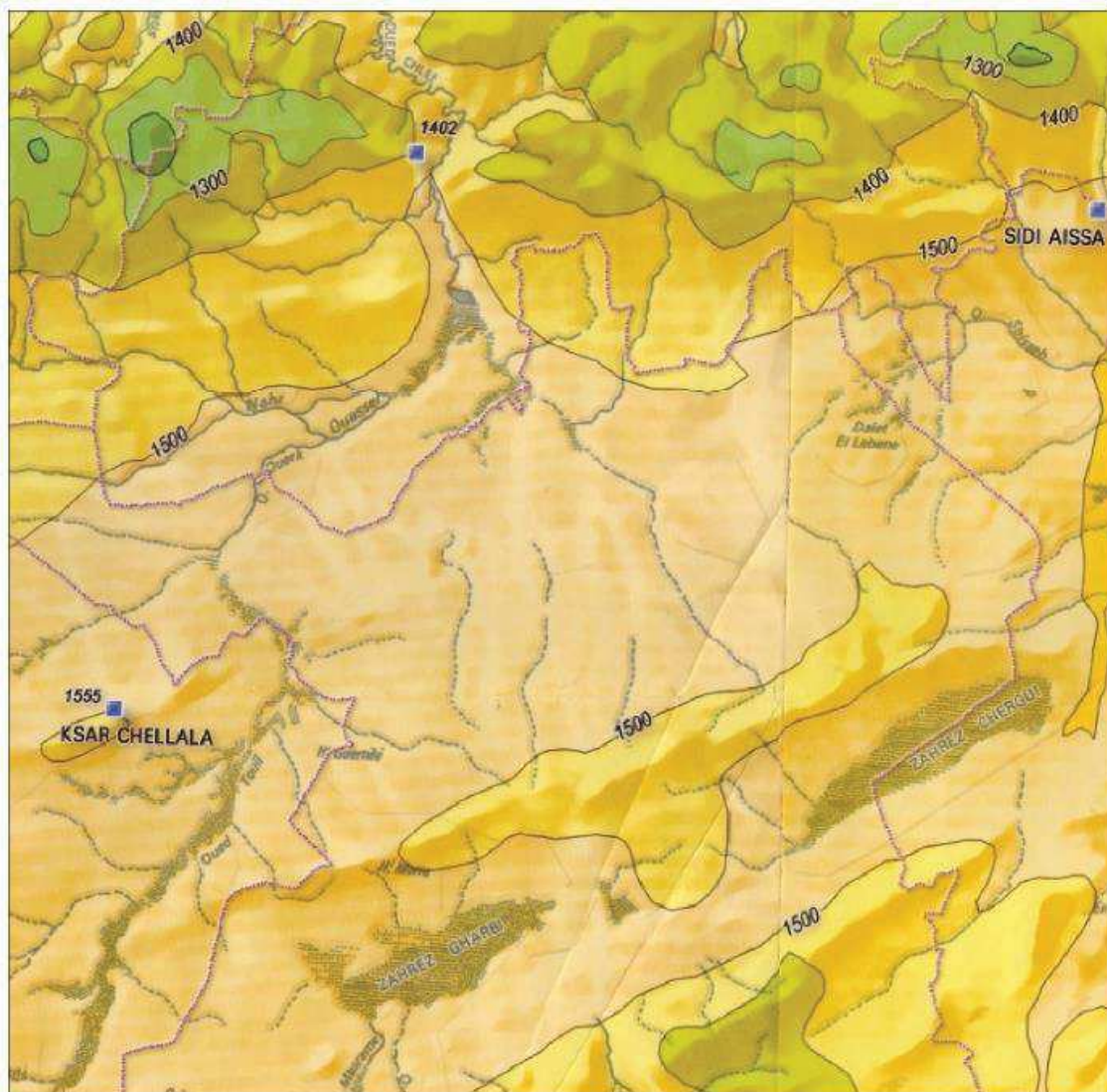
Annexe V : Synthèses des coupes géoélectriques de la plaine d'Ain Oussera (ALGEO.1980)



Annexe VI : Synthèses des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère Albien de la plaine d'Ain Oussera
(ANRH)

Nom du point	Coordonnées Lambert		T (10^{-3} m ² /s)	K (10^{-5} m/ s)
	X (m)	Y (m)		
P1	553250	246330	2	1.02
P2	517350	237850	5.85	2.52
P4	555750	236450	0.32	0.29
P6	550750	241150	0.836	0.44
P7	546700	231600	1.88	1.11
P8	535400	239000	4.7	1.88
P9	530000	239350	1.08	1.21
P10	542650	220800	0.553	0.26
P11	524050	225925	0.82	1.19
P12	528850	213350	4.6	4.89
P15	492650	197600	1.8	2.05
P16	513000	230600	0.047	0.05
F1 Bordj El Hammam	557400	218700	0.0094	0.00
F10 Ain Oussera	516825	237930	5.7	2.85
F2 Bouiret Lahdeb	540400	219000	7.4	2.96
F4 Had Sahar	551950	230200	1.57	0.75
F5 Had Sahary	550050	230250	0.095	0.05
F8 Ain Oussera	517800	238250	10.5	5.25
G3 Saadat	489785	235739	0.058	0.02
Had Sahary	558000	228950	0.013	0.00
L3 Boumidouna	504568	236389	0.031	0.02
F1 Boughzoul	543200	242100	6.5	2.60
Guernini G1	502250	216000	0.086	0.06
Guernini G2	503000	216600	0.044	0.03
IRR 1 Guernini	498100	214300	5.2	2.80
IRR 2 Guernini	504500	216700	5.6	2.92
IRR 3 Guernini	496000	204500	6.7	3.42
IRR ZC2	496000	198250	1.83	0.77
IRR ZC3	497400	198200	4	1.60
IRR ZC4	495800	199000	4.72	2.36
UP1 Benhar	536850	223900	2	0.80
UP1 Guernini	500000	210000	3.2	1.60
UP2 Benhar	537800	223500	2.8	1.12
UP2 Birine	552400	244550	2.6	1.30
UP3 Benhar	536600	222400	0.24	0.10
UP3 Birine	554000	245200	3.9	1.56
UP4 Benhar	535250	222150	0.85	0.34
UP5 Benhar	538500	226350	0.108	0.05
F5	535150	239050	4.95	1.59
Morrich	544650	247900	7	4.96
B1 Afia	553200	246500	2.44	1.37
B2 Khadjane	555500	244500	0.0627	0.03
B3	553800	243650	2	0.67
B4	552100	249000	4.2	1.68
Hassi Guernini G1	497500	211000	0.8	0.84
Hassi Guernini G2	496100	211650	43	43.00
F1 Birine	548588	242429	0.146	5,83
F2 Birine	547900	243966	6,78	2,71
F3 Birine	545711	243215	3,73	0,94

Annexe VII : Extrait de la carte d'Evapotranspiration de la plaine d'Ain Oussera (ANRH. 2002)



Extrait de la carte
d'évapotranspiration de la plaine
d'Ain Oussera .ANRH-2002

Echelle : 1 / 550 000

Annexe VIII : Levés piézométriques de la nappe de la plaine d'Ain Oussera durant l'année 2014

N° Puits	Coordonnées Lambert		Z(m)	Date	NS mai 2014	NP mai 2014
	X (m)	Y (m)				
2	528783	225675	733.12	18/05/2014	13.75	719.37
21	523780	236659	703.72	18/05/2014	30.4	673.32
23	522887	220883	771.13	18/05/2014	23.9	747.23
27	518999	231533	730.9	18/05/2014	42.2	688.7
31	512539	229334	736.9	18/05/2014	8.4	728.5
35	505456	220947	736.9	18/05/2014	55.6	681.3
36	515709	222839	775.95	19/05/2014	41.1	734.85
59	504214	229881	747.97	20/05/2014	35.4	712.57
P.9	529515	233313	708.97	21/05/2014	31.8	677.17
PZ6	526852	229612	718.8	22/05/2014	38.2	680.6
PZ11	523687	225.999	743.55	23/05/2014	30.9	712.65
514	543.230	219665	800.28	19/05/2014	13.4	786.88
39	550492	235538	734.07	19/05/2014	43.4	690.67
42	547972	239900	710.6	19/05/2014	44.4	666.2
59	550976	225867	747.97	19/05/2014	35.5	712.47
84	537167	237506	695.42	19/05/2014	35.5	659.92
124	552812	231331	773.56	19/05/2014	39.4	734.16
PZ7	545973	231540	733.58	19/05/2014	36.1	697.48
10	553600	226.000	785.3	20/05/2014	9.95	775.35
PZ2	534700	233891	699.71	20/05/2014	32.3	667.41
PZ3	540112	233082	706.6	20/05/2014	30.1	676.5
PZ1	531993	231879	707.98	20/05/2014	35.4	672.58
PZ4	546747	237921	712.52	20/05/2014	39.5	673.02
PZ5	548256	243105	713	20/05/2014	38.15	674.85
7	521283	215888	805.24	21/05/2014	47.55	757.69
9	502957	216664	799.13	21/05/2014	40.2	758.93
16	513025	210419	836.19	21/05/2014	28.9	807.29
25	504975	206950	802.24	21/05/2014	22.2	780.04
26	505363	208624	800.26	21/05/2014	16.2	784.06
PZ12	527400	215874	797.51	21/05/2014	48.1	749.41
126	490225	220800	721.46	21/05/2014	7.5	713.96
130	497575	223256	760.92	21/05/2014	41.8	719.12
29	491116	204468	794.71	22/05/2014	15.8	778.91
47	485650	205950	766	22/05/2014	17.8	748.2
50	480515	206087	751.96	22/05/2014	2.2	749.76
128	496887	206620	794.95	22/05/2014	24.4	770.55
13	488500	190700	845.26	22/05/2014	8.6	836.66
36	480375	193350	791.75	23/05/2014	14.2	777.55
F14	516624	238426	696.860	23/05/2014	27.000	669.860
F16	510173	235398	708.000	23/05/2014	35.000	673.000
109	485484	227828	733.000	23/05/2014	45.300	687.700