

UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID-TLEMCEN

N° d'ordre : / DST/

**FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
ET DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS**

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

**LABORATOIRE RESSOURCES HYDRIQUES, MINIERES ET PEDOLOGIQUES :
CHOIX TECHNOLOGIQUE ET LEGISLATION DE L'ENVIRONNEMENT**

MEMOIRE DE MAGISTER

OPTION

Ressource en Eau dans leur Environnement

Présenté par

Moussa BOUGUEFDA

**MODELISATION DE LA NAPPE DU CRETACE INFERIEUR DE LA
GOUTTIERE SYNCLINALE D'EL MAADER**

(MONTS DES KSOURS-ATLAS SAHARIEN OCCIDENTAL).

Soutenu le...../...../2013.devant les membres du jury

Mme GHELLAI Nasser	Professeur.	Univ. TLEMCEN	Président
Mr BOUANANI Abderrezak	Professeur.	Univ. TLEMCEN	Encadreur
Mme ADJIM Fouzia	Professeur.	Univ. TLEMCEN	Examineur
Mr SEDDINI Abdelali	Professeur	Univ. TLEMCEN	Examineur

Dédicaces

Il y a certaines satisfactions que les mots et les phrases parviennent difficilement à les exprimer. Cela nous arrive lorsqu'il faut visualiser une émotion profonde afin d'être à la délicatesse des êtres qui nous sont très chers.

De plus, un mémoire n'est pas le fruit d'un seul travail de son auteur, mais le résultat de plusieurs et profondes collaborations, de ce fait :

Je dédie ce travail :

- ✎ A la femme qui m'a porté toute ma vie et qui m'a enveloppé de gentillesse. A la femme la plus extraordinaire et la plus douce du monde. Mère, je t'exprime mon profond amour.
- ✎ A celui qui a été et il est pour moi le modèle, la référence, à mon père, je lui exprime mon profond respect et j'espère que j'ai été à la hauteur. Ma joie est que tu sois fier de moi.
- ✎ A mes chers frères : Amar et son fils « Tayeb, Abdellah », Ali, Mohamed, Youcef.
- ✎ A mes sœurs : Zohra, Oum Elnounne et sa fille (wassila), Asmae, Fatiha.
- ✎ Aux familles : GUELLIL, BOUGUEFDA, YAICH.
 - ✎ A mes amis : Fateh, Tayeb, Kamel, Miloud, Hichem, Karim, Abdelkader, Ali, Balkacem, Amar.
 - ✎ A toute la promotion magister année 2009-2010
 - ✎ A tous ceux que je porte dans mon cœur



Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur **BOUANANI Abderrezak**, Professeur à l'université de Tlemcen, pour m'avoir accordée sa confiance en acceptant d'encadrer ce travail, pour son soutien, pour sa constante disponibilité, pour tous les conseils qu'il m'a promulgués et pour l'aide précieuse qu'il m'a fournie.

Mes vifs remerciements et mes respects les plus distingués vont à Madame **GHELLAI Nassera**, Professeur à l'université de Tlemcen, pour avoir accepté de juger ce travail et de me faire l'honneur de présider mon jury de mémoire.

J'adresse mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance à **Madame ADJIM Fouzia**, Professeur à l'université de Tlemcen et Monsieur **SEDDINI Abdelali**, Professeur à l'université de Tlemcen qui ont bien voulu examiner ce travail et faire partie du jury de ce mémoire.

On n'oublie pas de présenter nos chaleureux remerciements à tous mes enseignants de la faculté des sciences de la terre : université de Tlemcen, aux quels je dois beaucoup pour ma formation.

Enfin, Mes remerciements sont adressés aussi aux responsables et agents de la direction de l'hydraulique de la wilaya de Naama pour leur collaboration.

ملخص

ينتمي خزان المياه الجوفية الطباشيري السفلي لمنطقة المعدر الى سلسلة جبال القصور(الأطلس الصحراوي الغربي)

ويزود السكان بالماء الشروب و المساحات الفلاحية لمنطقة تيبوت (شرق عين الصفراء)

وتعد التركيبة الجيولوجية لمنطقة المعدر المتمثلة في الطبقات الصخرية ذات السمك الهائل بمثابة خزانات للمياه الجوفية العصر الطباشيري السفلي.

نظرا إلى الأخطار الطبيعية المرتبطة (انخفاض محسوس في مستوى المياه الجوفية ناجم عن قلة كمية التزويد) و مختلف الظواهر البشرية (الإفراط في استغلال المياه الجوفية لتلبية الاحتياجات نظرا إلى النمو الديمغرافي و إنشاء العديد من المساحات المسقية) فإن تسيير الموارد المائية بنموذج رياضي يعد ضروريا

بعد تمثيل الأداء العام لنظام المياه الجوفية، باستخدام نموذج رياضي على أساس طريقة الفروق المحدودة في النظام الدائم والمؤقت يحسن معرفة الخصائص الهيدروليكية لطبقة المياه الجوفية وتقييم شامل على توازن المياه

وقد ساهمت هذه النمذجة الرياضية لمعرفة المياه الجوفية للعصر الطباشيري السفلي لمنطقة المعدر والية عمل هاته المياه مع التنبؤ تغيراتها في المستقبل

كلمات مفتاحية: الطباشيري السفلي- مقعر- المعدر- النمذجة الرياضية - محاكاة

RESUME

Résumé

La nappe Barrémo-Albo-Aptienne de la gouttière synclinale d'el maader qui fait partie des Monts des Ksour (Atlas Saharien occidental), alimente les habitants ainsi que les périmètres agricoles de cette région (Est Ain Sefra).

La structure géologique de la région d'el maader forme des structures gréseuses importantes très riches en eau lié principalement à la géométrie étendue.

De plus, face aux risques liés aux phénomènes naturels du climat aride et faible impluvium, et aux phénomènes anthropiques : sur exploitation de la nappe de Maader, pour les besoins d'alimentation suite à la croissance démographique et surtout la création de plusieurs périmètres agricoles, une gestion des ressources en eau avec un modèle mathématique devient indispensable.

l'utilisation du modèle mathématique basé sur la méthode des différences finies en régime permanent et transitoire a permis de mieux comprendre les rôles relatifs des facteurs essentiels du système.

Cette modélisation mathématique a apporté une contribution à la connaissance du fonctionnement de la nappe barrémo-albo-aptienne du synclinal d'el maader, et par conséquent leur gestion, en particulier dans le cadre de l'aménagement des eaux souterraines.

Mots clé: Barrémo-Albo-Aptien, synclinal, Maader, modèle mathématique, simulation

ABSTRACT

Absract

The Barremo Albo-Aptian water table of El maader is a part of the Ksour Mountains (Western Saharian Atlas), supplies the inhabitants and the agricultural in this area (East of Ain Sefra).

The geological structure of the area El maader form important structure of sandstone is very rich in water, it located in extensive formations.

Moreover, given the risks associated with natural phenomena of the arid climate and low catchment, and anthropogenic phenomena on exploitation of the water table of Maader Syncline for power continued population growth and particularly the creation of several agricultural areas needs management of water resources with a mathematical model is indispensable.

The use of mathematical model based on the end difference method in permanent and transient which facility to understand the roles of relative factors of system.

This mathematical modeling has contributed to the knowledge of operation of the Barremo Albo-Aptian water table and gives a better understanding of the workings, especially the management of groundwater.

Key words: Barrémo-Albo-Aptien, synclinal, Maader, mathématique modèle, simulation

TABLES DES MATIERES

TABLES DES MATIERES

Dédicace	I
Remerciements	II
ملخص	III
Résumé	III
Abstract	III
Tables des matières	IV
Listes des tableaux	V
Listes des figures	VI
Introduction générale	VII

GENERALITE	
1. Situation géographique générale	01
1.1 La partie orientale	01
1.2 partie occidentale	01
2. Situation géographique du secteur d'étude	03
3. Historique des études :	04
CHAPITRE 1 CLIMATOLOGIE	
2.1. Précipitations annuelles à la station d'Ain Sefra	06
2.2. Précipitation mensuelles	07
2.3 Les précipitations saisonnières	08
3. Les températures	09
4 – Etude du climat	10
4.1. Méthode de Gaussen et Bagnouls	10
4.2. Les indices climatiques	11
4.2. 1-Indice d'aridité de DE Martonne	11
4.3. Climagramme d'Emberger	12
4.4. Indice de Stewart	13
5. Evapotranspiration	14
5.1. L'évapotranspiration potentielle (ETP)	14
5.2. L'évapotranspiration réelle (ETR)	15
5.2.1 La méthode de TURC	15
5.2.2. La méthode de THORNTWAITE	16
5.2.3. Déficit d'écoulement :	16
5.2.4 Méthode de Verdeil	16
Conclusion :	18

TABLES DES MATIERES

CHAPITRE 2 GEOLOGIE	
1- Cadre géologique générale	19
2- Cadre géologique du secteur d'étude	19
3- Aperçu géologique	21
3.1 Le trias :	21
3.2 L'Infra lias :	21
3.3 Le jurassique :	22
3.3.1 Le Dogger (jurassique moyen) :	22
3.3.2 Malm :	23
3.4 Jurassique supérieur - Crétacé inférieur :	25
3.4.1 La formation d'Aïssa	25
a- Membre inférieur ou membre des alternances espacées	25
a.1 Terme A	25
a.2 Terme B	25
b. Le membre supérieur	25
b.1 Terme C	26
b.2 Terme D	26
3.4.2 La «Formation de Tiloula» (556m)	26
a. Le membre inférieur	26
a.1 Le terme A	26
a.2 Le terme B	27
b. Le membre supérieur	27
b.1 Terme C	27
b.2 Terme D	27
b.3 Terme E	28
3.4.3 La formation de Tiout	28
3.5 Cénomaniens inférieur	30
3.6 Le Cénomaniens supérieur – turonien	30
3.7 Les formations post-turonien	30
3.8 Le Quaternaire	31
CHAPITRE 3 HYDROGEOLOGIE	
1- Introduction :	32
2- Cadre hydrogéologique de la région	32
2.1 - Synclinal d'Aïn Séfra	32
2.2 - Synclinal de Tiout (Maàder)	33
3 - Les structures de Tiout - Aïn El Hadjadj – Asla	34
3.1 - Les structures de Tiout	34
3.2 - Les structures de Koudiat Tiourtelt	35
3.3 - Les structures de Dalaâ Miloudah	35
4 - Les formations aquifères	35
4.1- La nappe du Jurassique	35
4.2- La nappe Barremo-Albo-Aptienne	35

TABLES DES MATIERES

4.3- La nappe du Quaternaire	36
5. Bassin versant de Tiout	36
6 - les sources	38
6.1 - Ain Tessala	38
6.2 - Sources Aptiennes du Djebel Aïssa	38
6.3 - Sources de Tiout	39
6.4 - Ain Tiourtelt	40
7- hydrodynamique	40
7.1- Interprétation de la carte piézométrique	41
8 - Les essais de puits et pompage d'essai	42
8.1 Les essais de pompage par paliers	43
8.1.1 Courbe caractéristique	43
8.1.2 Calcul de débit spécifique	44
8.2 Les essais de pompage dans les forages Maader	44
9. La transmissivité	49
10. Le coefficient d'emmagasinement	49
Conclusion	50
CHAPITRE 4 MODELISATION	
1. Introduction	51
2. Etude théorique de la modélisation	51
2.1 Définition d'un modèle	51
2.2 Méthode de modélisation	51
2.2.1 Les différences finies	52
2.2.2 Les éléments finis	52
2.3 Méthodes de résolution	52
3. Traitement des systèmes aquifères multicouches	53
4. Quelques perfectionnements utiles de la méthode des différences finies	55
4.1 Amélioration de la discrétisation spatiale	55
4.1 Maillage de type "écossais"	56
4.2 Maillage de type "gigogne"	56
5. Conditions aux limites	57
5.1 Limite à potentiel imposé	57
5.2 Limite à flux imposé	57
5.3 Condition de surface libre	58
6. Calage	58
7. Validation	58
8. Application de modélisation à la nappe Barrémo -Albo- Aptien de Maader :	59
8.1 Outil :	59
8.2 Les paramètres hydrodynamiques :	59

TABLES DES MATIERES

8.2.1 La transmissivité	60
8.2.2 Le coefficient d'emmagasinement	60
9. Discrétisation spatiale des formations géologiques	61
10. Discrétisation de l'espace et construction de grille du modèle	61
11. Calage du modèle	62
11.1 Calage en régime permanent	62
11.1.2 Piézométrie	62
11.1.3 Paramètres de calage	65
11.1.4 Bilan de la nappe	66
11.2 Le modèle en régime transitoire	67
11.2.1 La carte de répartition des coefficients d'emmagasinement	67
11.2.2 La carte simulée 2008	68
11.2.2 La carte simulée 2009	70
11.2.3 L'allure générale de la carte piézométrique simulée 2010	70
12. Les scénarios	71
12.1 Prélèvement	71
12.2 Recharge	72
Conclusion	74
CHAPITRE 5 HYDROCHIMIE	
1. Introduction	75
2. Contrôle des analyses par balance ionique	75
2.1 Les paramètres physiques	76
2.1.1 Le potentiel d'hydrogène	76
2.1.2 La minéralisation	76
2.1.3 La dureté totale	77
3. Interprétation des cartes d'iso- teneurs	78
3.1 Carte d'iso-teneur Ca^{++}	78
3.2 La carte d'iso-teneurs en Mg^{++}	78
3.3 La carte d'iso-teneurs en Na^+	79
3.4 Carte d'isoteneur en Cl^-	80
3.5 Cartes d'iso-teneurs en So_4^-	81
3.6 Carte d'iso-teneurs en Bicarbonates (HCO_3^-)	81
4. Qualité des eaux pour l'irrigation selon le SAR	82
5. Représentations graphiques de la qualité des eaux	83
5.1 Diagramme de Piper	83
5.2 Diagramme de Schoeller Berkloff	85
5.3 Diagramme de Stiff	87
Conclusion	88
CONCLUSION GENERALE	89
BIBLIOGRAPHIE	90
ANNEXES	93

LISTE DES TABLEAUX

Liste des figures

Figure 01 : Les monts des ksour dans leur contexte régionale : partie méridionale de l'atlas saharien et piémonts de la plate forme saharienne (Benest 1985).	02
Figure 02 : Situation géographique du secteur d'étude Photos satellite (Imagerie Nasa, Geocover- 2010).	03
Figure03 : variation des précipitations annuelles à la station d'Ain Sefra (1985-2010).	07
Figure04 : Moyennes mensuelles des précipitations à la station d'Ain Sefra (1985-2010).	07
Figure 05 : Histogramme des précipitations saisonnières (mm)à la station d'Ain Sefra (1985-2010).	08
Figure 06 : variations des températures moyennes mensuelles à la station d'Ain Sefra (1985-2010).	09
Figure 07 : Diagramme pluviothermiques de la station d'Ain Sefra (1985-2010).	10
Figure08 : Abaque d'indice d'aridité De Martonne	12
Figure 09 : Climagramme d'Emberger.	13
Figure 10 : Abaque de Verdeil (09/1988) Calcul du déficit d'écoulement en Algérie	17
Figure 11 : Carte géologique de la région d'Ain sefra (GALMIER 1972, digitalisé et modifiée)	20
Figure 12 : coupe lithostratigraphique des formations du Lias et Dogger dans la partie centrale des Monts des ksour (Douihasni, 1976)	24
Figure 13 : Coupe lithostratigraphique des formations du Jurassique-Crétacé dans la partie centrale des monts des Ksour (KACEMI, 2002).	29
Figure 14 : Coupe hydrogéologique schématique (Rahmani 2010)	33
Figure 15 : Coupe géologique Djebel Aïssa – Maâder – Tiout (MANSOUR2007 modifie)	34
Figure 16 : Réseau hydrographique de la région de Tiout	37
Figure 17 : Coupe schématique montrant les conditions d'émergence de Aïn Tessala (MANSOUR 2007)	38
Figure 18 : Coupe schématique montrant les conditions d'émergence d'Ain Aïssa	39

LISTE DES TABLEAUX

Figure 19 : Coupe schématique montrant les conditions d'émergence des sources de Tiout	
Figure 20 : Carte piézométrique (Septembre 2010)	40
Figure 21 : Carte hydrogéologique de la nappe d'El Maader (Janvier 2010)	42
Figure 22 : Courbe caractéristique $S = f(Q)$.	43
Figure 23 : courbe de descente (Tiout 1)	45
Figure 24 : courbe de descente (Mehisserat 1)	45
Figure 25 : Courbe de descente (Maader 1)	46
Figure 26 : Courbe de descente (Maader 2)	46
Figure 27 : Courbe de descente (Maader 3)	47
Figure 28 : Courbe de descente (Maader 4)	47
Figure 29 : Courbe de descente (Mehisserat 2)	48
Figure 30 : Courbe de descente (Slih 2)	48
Figure 31 : Bilan des flux en eau sur une maille i	52
Figure 32 : discrétisation spatiale d'un domaine bicouche	54
Figure 33 : bilan des flux en eau sur la maille i dans le cas multicouche	55
Figure 34 : discrétisation spatiale en mailles rectangulaires (type "ecossais")	56
Figure 35 : maillage irrégulier, type "gigogne"	56
Figure 36 : limite à flux nul (MARSILY, 1981)	57
Figure 37 : Condition de surface libre (MARSILY, 1981)	58
Figure 38 : carte des épaisseurs de l'aquifère	61
Figure 39 : le maillage et les conditions aux limites du domaine modélisé	62
Figure 40 : superposition des courbes des potentiel calculer et mesurés	63
Figure 41 : corrélation entre les potentiels mesurés et calculés en régime permanent par rapport à la droite $x=y$.	65
Figure 42 : répartition de la transmissivité T (m^2/s) du domaine modélisé	66
Figure 43 : répartition des coefficients d'emménagement du domaine modélisé	68
Figure 44 : Le carte simulée 2008 de la nappe Barrémo-Albo-Aptienne	69

LISTE DES TABLEAUX

Figure 45 : Le carte simulée 2009 de la nappe Barrémo-Albo-Aptienne	70
Figure 46 : La carte piézométrique simulée 2010 de la nappe Barrémo-Albo-Aptienne	71
Figure 47 : simulation hydrodynamique (prélèvement)	72
Figure 48 : simulation hydrodynamique (recharge)	73
Figure 49 : Carte de minéralisation	76
Figure 50 : Carte de dureté	77
Figure 51 : carte isoteneur Ca^{++}	78
Figure 52 : carte isoteneur Mg^{++}	79
Figure 53 : carte isoteneur $Na^+ K^+$	80
Figure 54 : carte isoteneur Cl^-	80
Figure 55 : carte isoteneur So^{--4}	81
Figure 56 : carte isoteneur $Hco-3$	82
Figure 57 : Diagramme de Piper	84
Figure 58 : diagramme de Shoeller Berkallof.	86
Figure 59 : Diagramme de Stiff	87

Introduction générale

Les monts des ksour sont constitués par des vastes synclinaux à fond plats ;

La première partie de ce synclinal se situe entre El Hendjir et Ain Sefra le flanc étant fortement masqué par les dunes d'Ain Sefra.

La deuxième partie du synclinal se trouve à l'E-NE d'Ain Sefra dans la région de Tiout plus connue sous le nom de Maader (qui fait l'objet de notre étude), c'est un synclinal typique des monts des Ksour à fond plat affectant l'Albien encadré par les anticlinaux jurassiques de Djebel Aissa et Djara.

A l'instar des villes situées en milieu aride, la disponibilité de l'eau a toujours été au centre des préoccupations des collectivités locales.

Les premiers habitants ont fait leur prospérité à partir des adductions conçues gravitairement pour la distribution en eau potable et l'irrigation, ainsi que l'abreuvement du cheptel, à partir des plus anciennes sources (la source de la dune et de Tiout).

Le but de travail est de comprendre et modéliser les flux d'eaux souterraines dans la région de Maader pour une meilleure gestion des ressources en eau dans la région.

Le présent de travail a été scindé en cinq chapitres ;

Nous présenterons dans le premier chapitre, l'étude climatique qui permet de déterminer le type de climat régnant dans la zone concernée et les éléments du bilan hydrologique bilan à partir des données de températures et de précipitations.

Dans le deuxième chapitre nous intéressons à la géologie de la région, pour déterminer les différentes formations.

Une étude hydrogéologique a permis d'identifier les principaux aquifères, préciser la géométrie du réservoir barrémo-albo-aptien du synclinal de Maader et de déterminer les des paramètres géométriques et hydrodynamiques de l'aquifère qui nous conduiront à une meilleure compréhension de l'écoulement souterrain a fait l'objet du troisième chapitre.

INTRODUCTION GENERALE

Notre quatrième chapitre sera consacré à la modélisation des écoulements du système aquifère par l'utilisation du code de calcul ASMWIN 6.0 (Aquifere Simulation Model) en régime permanent et transitoire pour voir simuler plusieurs situations auxquelles la nappe sera confrontée. Ainsi dans la dernière partie de ce chapitre nous présenterons quelques scénarios d'exploitation.

Cependant, le cinquième chapitre sera consacré à une étude hydrochimique des eaux des forages et des sources du synclinal de Maader.

Enfin, ce mémoire est clôturé par une conclusion générale.

Généralité

1. Situation géographique générale:

La chaîne Atlasique oblique par rapport au littoral méditerranéen s'étend depuis la côte atlantique au Maroc jusqu'en Tunisie littorale.

En Algérie, la chaîne Atlasique a une longueur qui avoisine 1000 Km et une largeur de plus de 100 Km. Elle est située au Sud d'un ensemble septentrional orienté Est-ouest, représenté par les hautes plaines, le Tell et les massifs Kabyles et constitue la limite nord de la « plate forme saharienne »

L'Atlas saharien est formé de chaînons allongés, Orientés SW-NE à l'exception des Monts des Zibans qui sont orientés Est-Ouest. On reconnaît de L'Ouest vers L'Est :

La partie orientale :

- ✓ Les Monts des Zibans
- ✓ Les Aurès
- ✓ Les Nementchas

La partie occidentale :

- ✓ les monts d'Ouled Nail ou "Atlas saharien oriental" (Laghouat-Boussaâda).
- ✓ les monts des Amours ou "Atlas saharien central" (El Bayedh).
- ✓ les monts des Ksour ou "Atlas saharien occidental" (Ain Sefra).

La partie occidentale de l'Atlas saharien (monts des Ksour) située à environs 400Km au sud d'Oran, est limitée au Nord par les hautes plaines Oranaises, au sud par la plaine saharienne, à l'Ouest par le Haut Atlas Marocain et à l'Est par les monts des Amours (figure 01).

Les monts des Ksour sont caractérisés par des reliefs élevés avec certains sommets qui dépassent 2000m; Djebel Aïssa : 2236 m, Djebel M'zi : 2145 m, Mir el Djebel : 2109 m, Djebel Mekther : 2020 m.

GENERALITE

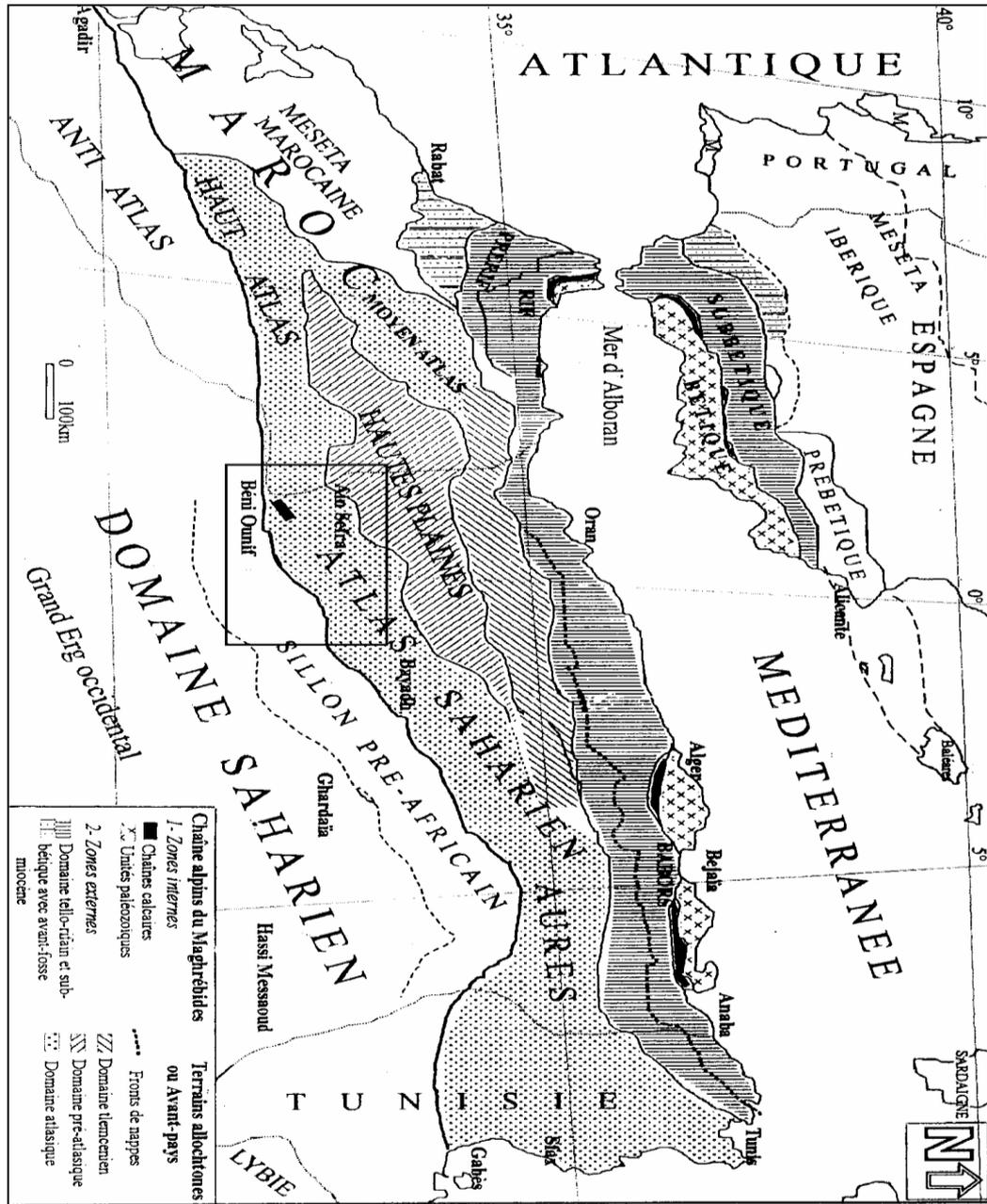


Figure 01 : Les monts des ksour dans leur contexte régional : partie méridionale de l’atlas saharien et piémonts de la plate forme saharienne (Benest 1985 modifié par Mansour 2007).

2. Situation géographique du secteur d'étude : (figure 02)

Tiout est située à 18 Km à l'Est d'Aïn Séfra, notre étude secteur fait partie des monts des ksour connu, sous le nom de Maader, ce secteur est limité par:

- Au Nord Djebel Aïssa.
- A l'Ouest Oued d'Aïn sefra.
- Au Sud Djebel Mekther et Djebel Djaara.
- A l'Est Djebel Afzouz

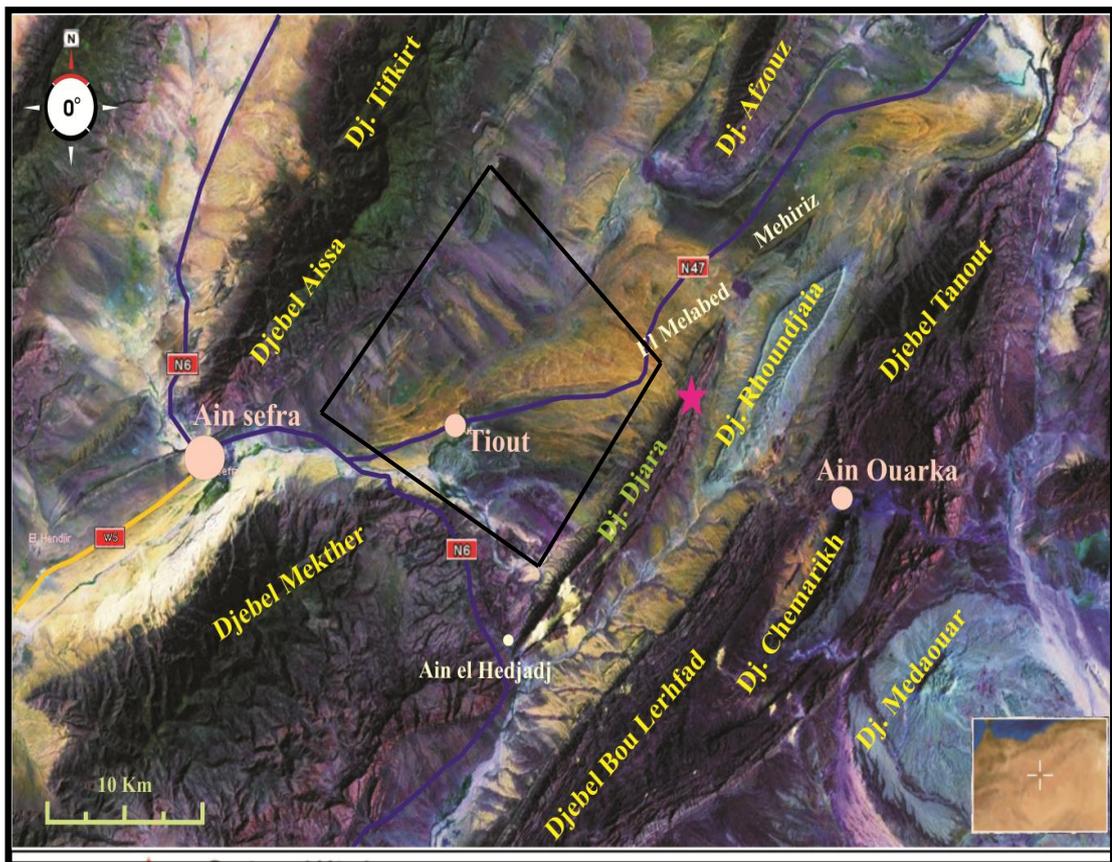


Figure 02: Situation géographique du secteur d'étude Photos satellite

(Imagerie Nasa, Geocover- 2010).

3. Historique des études géologiques (Atlas Saharien Occidental) :

Pouyanne et Peran (1853-1874) : la reconnaissance du Crétacé dans la région de Tiout (Ain Safra).

Welsch (1890) : travailla dans le djebel Mellah et identifia le jurassique moyen dans les dépôts rapportés ultérieurement au Lias.

Rilter et Flamand 1902 : ont attribué les « grés à dragées » à l'albien.

Flamand (1911) : présenta une importante thèse sur l'Atlas Saharien, le Tell et les régions frontalières Algéro-Marocaines, traitant plusieurs éléments dont la géomorphologie, la tectonique et la paléontologie.

Cornet(1947) : établit une synthèse stratigraphique et une analyse tectonique et apporta quelques modifications à l'échelle stratigraphique donnée par Flamand(1911).

Galmier (1951) : défini et décrit l'accident Nord Atlasique.

Dresney (1951) : montre que cet accident se prolonge au Maroc en bordure Nord du haut Atlas.

Cornet, Galmier et Lucas(1953) : étudient la série de Raha Zergo(secteur Ain ben Khelil).

Galmier (1953) : effectua des travaux sur l'accident Nord atlasique et montra que ce dernier est en réalité un déversement vers le Nord-Ouest exagéré jusqu'à un véritable chevauchement.

Lasnier (1965) : contribua à l'étude stratigraphique et micropaléontologique du Jurassique des hautes plaines Algérienne (Ain Sefra, Mécheria, Djebel Nador ;Hodna) et donna ainsi une stratigraphie plus complète du Jurassique.

Bassoullet(1966) : donne une première description de la coupe de djebel Chemarikh et découvre un niveau à *Asteroceras* qui lui permettra l'identification du lotharingien.

Lucas et Galmier (1967) : contribua à l'étude de Djebel Kerdacha. Dans la même année,

Bassoullet(1970) et all : découvrent des dinosauriens, des crocodiliens et des poissons dans l'Oued Boudjihane et El Abiodh Sidi Cheikh.

Galmier (1970) : réalisa neuf cartes photo-géologiques au 1/100.000° qui donnent une vue d'ensemble sur la tectonique des monts des Ksour.

Busson (1970) : réalise une synthèse fondamentale sur le secondaire Saharien

Bassoullet (1973) : présenta son travail fondamental sur le mésozoïque des monts des Ksour. Il établit une subdivision en quatre principaux ensembles lithostratigraphiques qui sont en liaison

GENERALITE

avec l'évolution sédimentaire du bassin.

Douihassi (1976) : présenta sa thèse de 3^{ème} dans la quelle il complète la partie stratigraphique de **Bassoulet** et donna une importante analyse structurale sur les monts des Ksour, en signalant l'existence d'une tectonique superposée.

Elmi(1978 ,1982,1986) : souligne les différences de l'évolution géodynamique entre les domaines atlasique(monts de Ksour), pré-atlasique (Nador de Tiaret) et tlemcenien (Monts de Ghar Robane).

Mahboubi (1983) : réalisa sa thèse sur les terrains post-Aptiens et Tertiaire de la bordure méridionale du Djebel Amour.

Kazi-Tani (1986) : présenta une synthèse géodynamique de la bordure Nord-Africaine en se basant sur une approche mégaséquentielle, il distingua deux groupe :

Groupe eo-alpin inférieur

Groupe eo-alpin médian

Ait Ouali (1991) : présenta dans sa thèse un travail important concerne le rifting des Monts des Ksour et la diagenèse des assises carbonatées du Lias.

Vially et al(1995) : utilisent les données de la recherche pétrolière pour définir le style structural de l'avant-pays alpin d'Algérie.

Mekahli (1995): présente une étude sur l'Héttangien-Bajocien supérieur des monts des ksour concernant la biostratigraphie, sédimentologie, évolution géodynamique et stratigraphie séquentielle.

KACEMI (2005) : Cartographie et dynamique sédimentaire de la série fin Dogger début Crétacé (Djara - Rhoundjaia) des Monts des Ksour (Atlas saharien, Algérie).

MANSOUR (2007) : hydrogéologie du continental intercalaire et du complexe terminal en domaine aride. Exemple des monts des ksour (Atlas Saharien Occidental)

RAHMANI (2010) : Apport des SIG dans caractérisation hydrodynamique et hydrochimique de la nappe crétacé inférieure de la région d'Ain Sefra (Atlas Saharien Occidental)

DERDOUR (2010) : modélisation hydrodynamique de la nappe des grés crétacé du synclinal de Remtha –Monts des ksour- Algérie.

CHAPITRE I

Climatologie

1- INTRODUCTION

L'étude du climat permet de donner à la région son caractère, son individualité climatique et les périodes sèches et humides.

Les paramètres climatiques utilisés pour cette étude proviennent des données recueillies auprès de la station métrologique d'Ain Sefra (tableau1), sur une durée qui s'étale de (1985-2010) pour les précipitations et les températures.

Tableau 01: caractéristiques de la station d'Ain Sefra.

Station	Latitude	Longitude	Altitude	Code
Ain Sefra	32°.76 N	00°.60 W	1058 m	60560

2- Etude des précipitations

Le climat en général et les précipitations en particulier sont de loin les éléments les plus importants qui conditionnent les écoulements aussi bien de surface que souterrains. Leur étude est donc plus que nécessaire pour pouvoir d'une part comprendre et analyser le comportement hydrologique de nos oueds et d'autre part établir un bilan d'eau pour nos bassins.

2.1. Précipitations annuelles à la station d'Ain Sefra :

Les précipitations annuelles et mensuelles sont reportées dans l'Annexe (Tableau –A-).

Nous constatons (figure 03) qu'il y a une irrégularité de la répartition des précipitations puisque des périodes sèches voir très sèches succèdent aux périodes humides, il existe deux périodes différentes, une au-dessus de la moyenne, c'est la période humide, et une au-dessous, c'est une période sèche. On remarque que sur toute la période deux années ont connu des pluies exceptionnelles de 380mm et de 450mm correspondants à 1990/91 et 2008/2009 dans lesquelles des inondations ont été enregistrées dans la région d'AinSefra.

-La plus faible valeur (39.9mm) est enregistrée en 1999-2000

-La valeur la plus élevée (448.62 mm) est enregistrée en 2008-2009

-La valeur moyenne est de 186.04mm

CLIMATOLOGIE

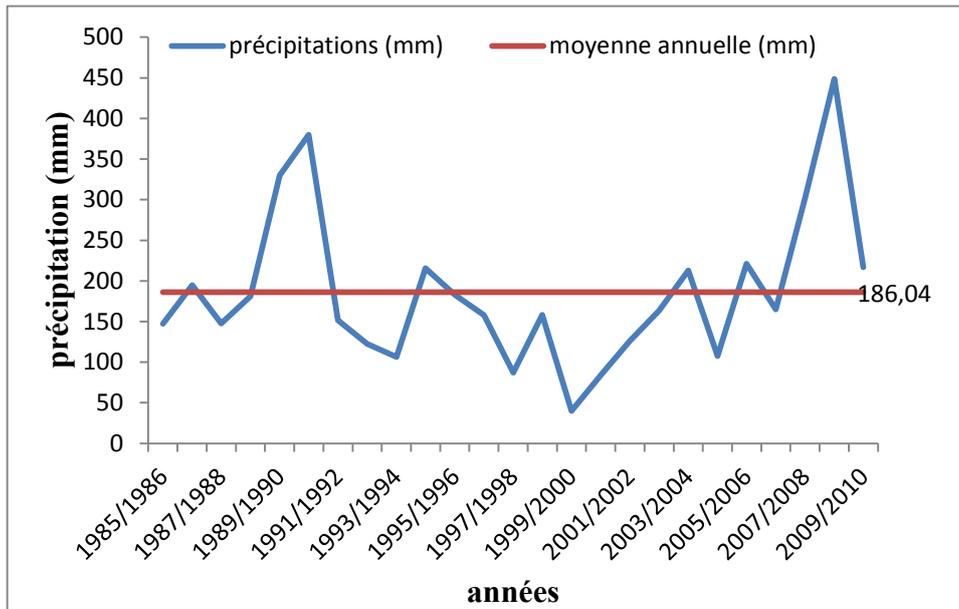


Figure03 : variation des précipitations annuelles à la station d'Ain Sefra (1985-2010).

2.2. Précipitation mensuelles :

Tableau 02: Le tableau ci-dessous montre les valeurs moyennes mensuelles des précipitations de la période (1985-2010).

mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
P(mm)	20.85	35.66	13.72	9.6	15.28	12.51	22.66	15.7	17.89	7.3	4.29	10.52

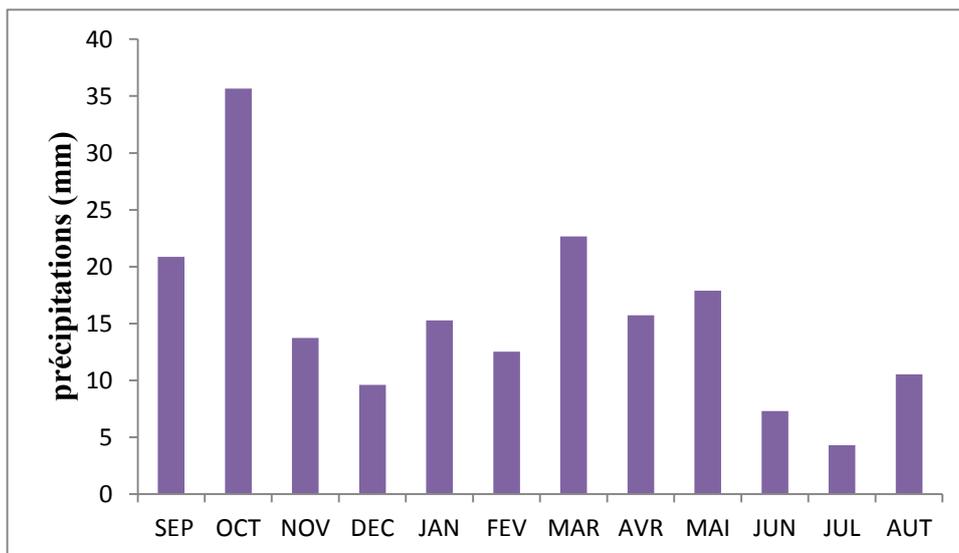


Figure04 : Moyennes mensuelles des précipitations à la station d'Ain Sefra (1985-2010).

CLIMATOLOGIE

L'histogramme (figure 04) montre que le mois d'Octobre est le plus pluvieux avec 35.66 mm, le mois de juillet est le plus sec avec 4.29 mm.

La pluviométrie moyenne annuelle est de 186,04 mm.

2.3 Les précipitations saisonnières :

Les quatre saisons de l'année correspondent à:

- Automne: Septembre, Octobre, Novembre (P=70.23mm)
- Hiver : Décembre, Janvier, Février (P=37.38mm)
- Printemps : Mars, Avril, Mai (P =56.26mm)
- Eté : Juin, Juillet, Août (P =22.11 mm)

La distribution des précipitations saisonnières sur la figure 05 montre que l'Automne et le Printemps sont les saisons les plus humides et l'Eté le plus sec.

Tableau 03 : précipitations saisonnières

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté
P (mm)	70.23	37.38	56.26	22.11

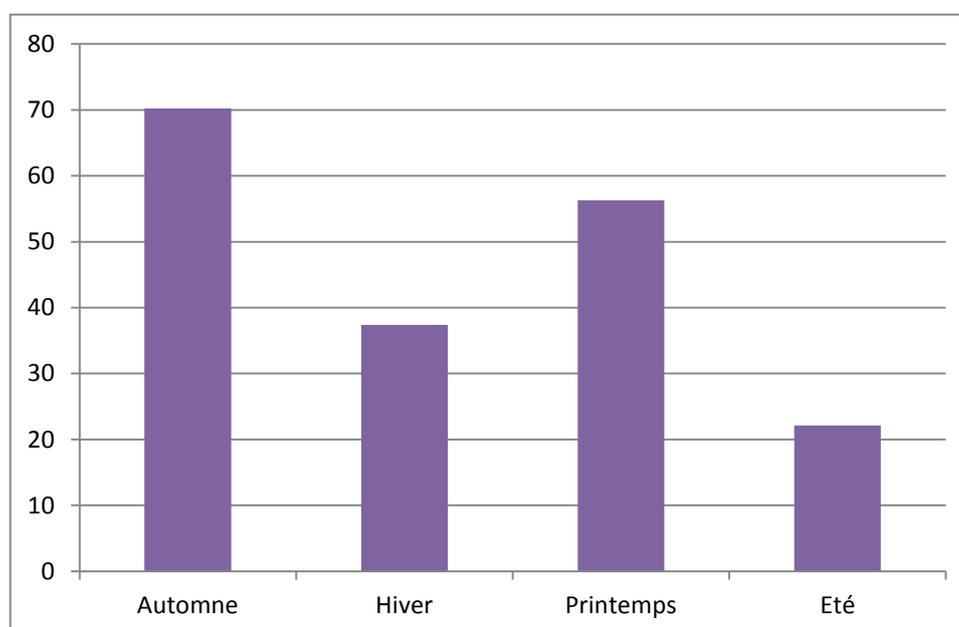


Figure 05 : Histogramme des précipitations saisonnières mm à la station d'Ain Sefra (1985-2010).

CLIMATOLOGIE

3. Les températures :

La température est un facteur important qui détermine le climat en interaction avec les autres facteurs météorologiques. Elle permet avec les précipitations le calcul des indices climatiques. Les données de la température disponibles pour la région d'Ain Sefra portent sur la période allant de 1985 à 2010.

Tableau 04 : La variation des Températures mensuelles à la station d'Ain Sefra.

Mois	sep	oct	nov	dec	jan	fev	mars	avr	mai	juin	juil	aout
TM	30.47	24.47	18.51	14.87	14.39	16.89	20.22	23.69	28.03	33.83	38.69	37.71
Tm	16.47	11.21	5.14	2.44	2.13	4.16	6.93	9.24	13.54	18.28	22.17	20.81
(TM+Tm)/2	23.47	17.84	11.82	8.65	8.26	10.52	13.57	16.46	20.78	26.1	30.4	29.26

La variation des Températures mensuelles à la station d'Ain Sefra (figure 06), indique que :

- les maxima (Tmax) : sont compris entre 14.39°C en janvier et 38.69°C en Juillet
- les minima (Tmin) : sont compris entre 2.13°C en janvier et 22.17°C en Juillet.
- les moyennes (Tmoy) : sont comprises entre 8.26°C en janvier et 30.4°C en Juillet.
- La moyenne annuelle est de 18.09°C

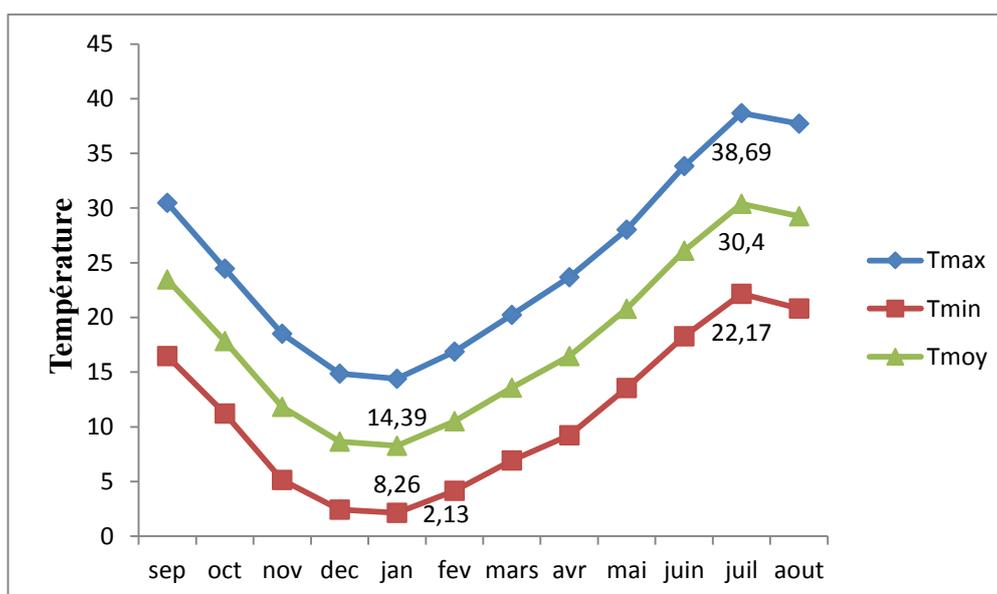


Figure 06 : variations des températures moyennes mensuelles à la station d'Ain Sefra

(1985-2010).

4 - ETUDE DU CLIMAT :

L'étude du climat est basée sur des méthodes graphiques et des indices climatiques.

4.1. Méthode de Gaussen et Bagnouls :

Pour Gaussen et Bagnouls, un mois sec est celui où le total moyen des précipitations exprimées en mm est inférieur ou égal au double de la température moyenne exprimée en degrés Celsius ($P \leq 2T$).

Cette relation permet d'établir des diagrammes pluviothermiques sur lesquels la température est portée à une échelle double de celle des précipitations (figure 07).

Tableau 05 : Température et précipitation moyenne mensuelles

mois	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AUT
P(mm)	20.85	35.66	13.72	9.59	15.28	12.51	22.66	15.71	17.89	7.3	4.29	10.52
T(C°)	23.47	17.84	11.82	8.65	8.26	10.52	13.57	16.46	20.78	26.1	30.4	29.26

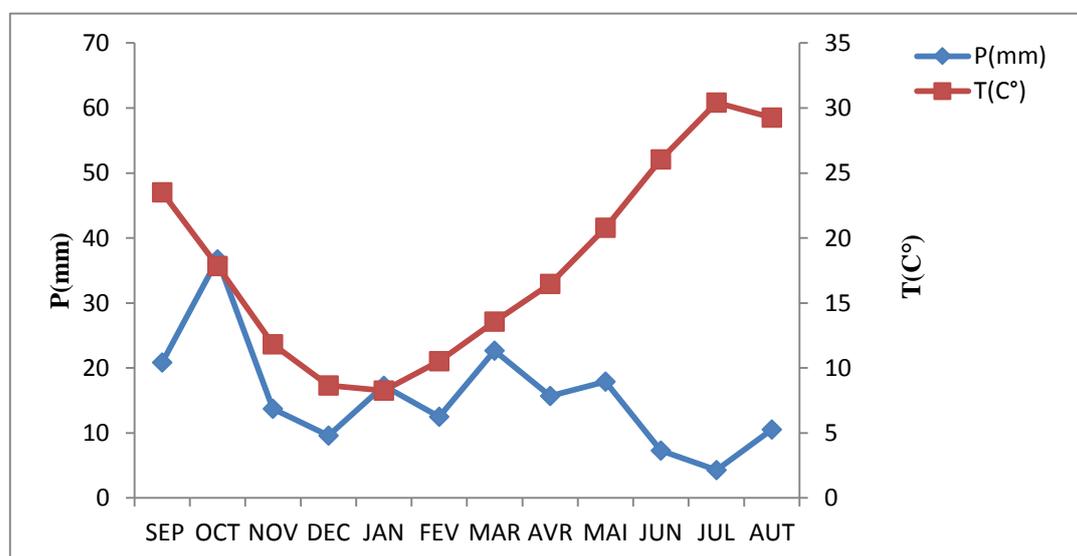


Figure 07 : Diagramme pluviothermique de la station d'Ain Sefra

On déduit du diagramme pluviothermique de la station d'Ain Sefra que:

- La courbe des températures passe au-dessus de celle des précipitations pendant, février, Mars, Avril, Mai, Juin, Juillet, Août, Septembre, Novembre, Décembre indiquant une période sèche.

- Pour les mois humides, la courbe des précipitations passe au-dessus de la courbe des températures pendant Octobre, janvier indiquant une période humides.

4.2. Les indices climatiques :

4.2. 1-Indice d'aridité de DE Martonne :

a- Indice annuel :

Cet indice est donné par la relation suivante :

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

Avec :

P: la moyenne des précipitations annuelles (mm).

T: la température moyenne annuelle pour la même période considérée.

Pour notre station : P = 186.04 mm T = 18.09°C.

I = 6.62

De Martonne a proposé la classification suivante :

I < 5 : climat hyper aride.

5 < I > 10 : climat désertique.

10 < I > 20 : climat semi-aride

I > 20 : climat humide.

Sur l'abaque (figure 08), la valeur de I reportée caractérise la région par un climat désertique.

L'indice annuel de De Martonne ne permet d'atteindre qu'une tendance globale de la station ; il est intéressant de considérer également les variations mensuelles de l'indice d'aridité.

b - Indice d'aridité mensuel de De Martonne :

Il est définie par :

$$i = \frac{12P}{T + 10}$$

Avec : P : précipitations moyennes mensuelles (mm)

T : températures moyennes mensuelle (°C)

CLIMATOLOGIE

Tableau 06 : les valeurs de l'indice d'aridité mensuelle (i).

mois	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AUT
P(mm)	20.85	35.66	13.72	9.59	15.28	12.51	22.66	15.71	17.89	7.3	4.29	10.52
T(C°)	23.52	17.84	11.82	8.65	8.26	10.52	13.57	16.46	20.78	26.1	30.4	29.26
i	7.46	15.37	7.54	6.17	10.04	7.31	11.53	7.12	6.97	2.42	1.27	3.21
climat	d	S a	d	d	S a	d	S a	d	d	hyp	hyp	hyp

Climat : d ; désertique, S a ; semi-aride, hyp ; hyper aride.

Les différents indices calculés nous conduisent à des résultats parfaitement concordants, la région d'étude est soumise à un régime désertique.

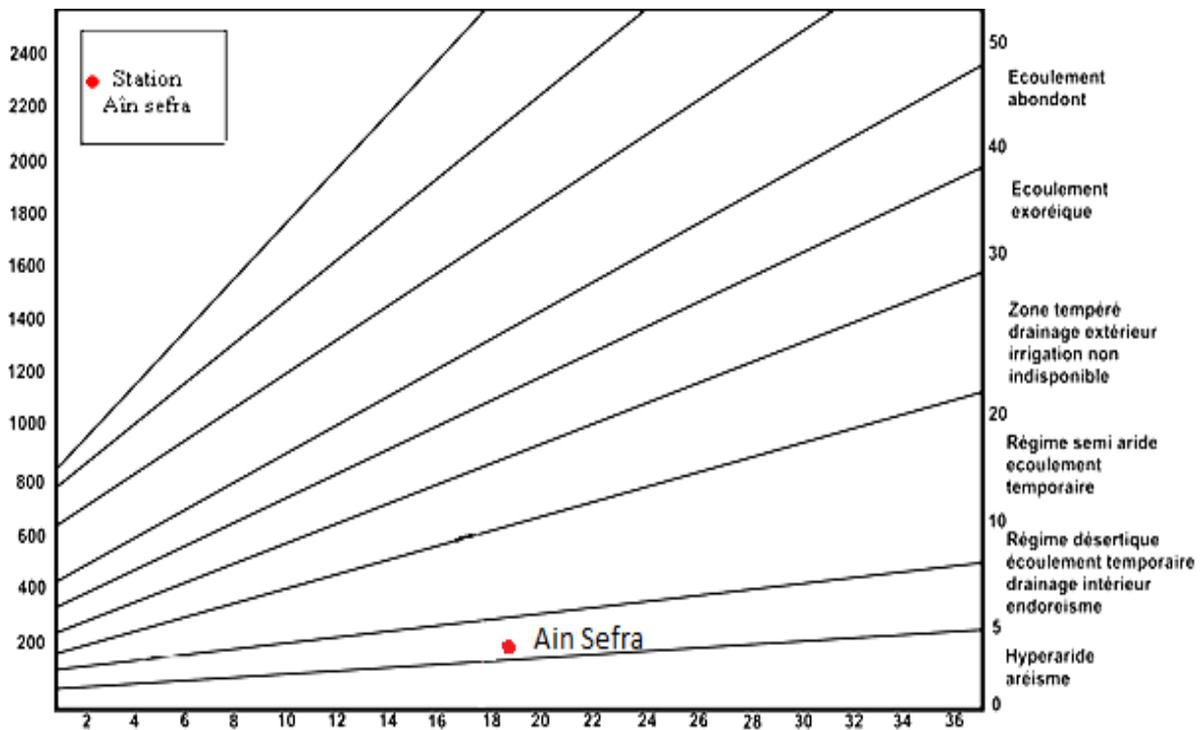


Figure08 : Abaque d'indice d'aridité De Martonne

4.3. Climagramme d'Emberger :

Le climagramme de L. EMBERGER permet d'obtenir le type de climat qui caractérise une région donnée.

$$Q2 = \frac{2000P}{(M^2 - m^2)}$$

CLIMATOLOGIE

P : précipitation moyenne annuelle (186.04)

M : moyenne des températures maximales du mois le plus chaud (Juillet) en degré absolu (°K) ($M = 38.69 + 273 = 311.69$)

m : moyenne des températures minimales du mois le plus froid (Janvier) en degré absolu (°k) ($2.13 + 273 = 275.13$)

Q₂ : quotient pluviométrique de L'EMBERGER

Q₂ = 17.34

Le point obtenu (figure 9) permet de caractériser la station d'Ain Sefra par un climat saharien avec un hiver frais.

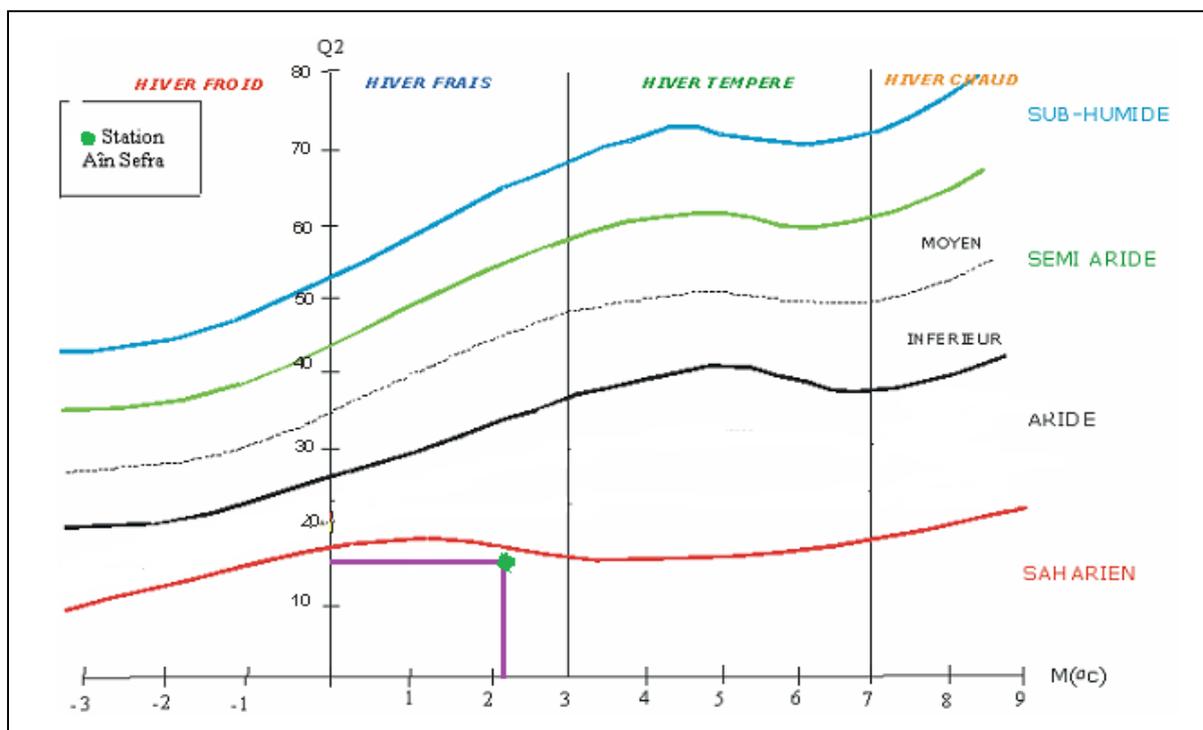


Figure 09 : Climagramme d'Emberger.

4.4. Indice de Stewart :

Il est définie par

$$Q_2 = \frac{3.43P}{M + m}$$

Avec : P : précipitation moyenne annuelle 186.04 mm

M : moyenne des maxima de température du mois le plus chaud en 38.69°C

m : moyenne des minima de température du mois le plus froid en 2.13°C

$$Q_2=15.63$$

Pour: $10 < Q_2 < 50$ climat semi-aride

$2 < Q_2 < 10$ climat désertique

$Q_2 < 2$ climat insaturé

Q_2 est compris entre 10 et 50, selon Stewart cette valeur caractérise un climat semi-aride.

5. Evapotranspiration :

L'évapotranspiration est la restitution de l'eau à l'atmosphère sous forme de vapeur à partir des végétaux, des sols, et des nappes libres. Elle dépend essentiellement des précipitations, de la température, du vent, de l'humidité, et de la texture du sol. Il y a par ailleurs lieu de distinguer :

- L'évapotranspiration potentielle (ETP), qui est la quantité qui pourrait être évaporée si le sol était constamment saturé

L'évapotranspiration réelle (ETR) qui est celle qui se produit sans que la surface évaporant ne soit saturée en eau, elle est donc inférieure ou plus égale à ETP.

5.1. L'évapotranspiration potentielle (ETP) :

Nous calculerons L'ETP en utilisant la méthode de THORNTWAITE.

$$ETP (C) = ETP * K$$

$$ETP = 1.6 + (10. T/I)^\alpha$$

Avec :

i : Indice thermique mensuelle $i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}$

I : Indice thermique annuelle $I = \sum i$.

T : Température moyenne mensuelle du mois considéré en °C.

K : Coefficient d'ajustement mensuel

$$\alpha = \left(\frac{1.6I}{100}\right) + 0.5 = 1.94$$

CLIMATOLOGIE

Tableau 07 : les valeurs évaporation et L'évapotranspiration potentielle

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A	ANN
T°(C)	23.52	17.84	11.82	8.65	8.26	10.52	13.57	16.46	20.78	26.1	30.4	29.26	18.09
i	10.42	6.86	3.67	2.29	2.13	3.08	4.53	6.07	8.64	12.20	15.37	14.51	89.77
ETP (mm)	103.6	60.6	27.2	14.8	13.6	21.7	35.6	51.8	81.5	126.8	170.5	158.3	
K	1.03	0.97	0.88	0.86	0.80	0.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.21	1.15	-
ETP Corrigé (mm)	106.7	58.8	23.9	12.7	10.9	18.6	36.6	56.0	97.0	150.9	206.3	182.1	961

La valeur de l'évapotranspiration potentielle annuelle trouvée est de 961mm, pour un indice thermique annuel de I=89.77.

5.2. L'évapotranspiration réelle (ETR) :

La méthode de THORNTHWAITE permet aussi de calculer l'évapotranspiration réelle, qu'on peut calculer aussi par la méthode de TURC, et la méthode de VERDEIL.

5.2.1 La méthode de TURC :

Après plusieurs tentatives de calculs de l'évapotranspiration réelle TURC propose une formule qui est applicable à tous les climats, elle est fonction des précipitations moyennes annuelles et des températures moyennes annuelles.

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

L : pouvoir évaporant avec $L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$

P : précipitations annuelles moyenne 186.04 mm.

T : températures moyennes annuelle 18.09 °C.

ETR : évaporation réelle annuelle mm.

On obtient ETR =189.8 mm, valeur supérieure à la précipitation moyenne annuelle.

CLIMATOLOGIE

3.2.2. La méthode de THORNTWAITE :

Cette méthode permet d'évaluer l'ETR et d'établir un bilan hydrique

Tableau 08 : le bilan hydrique

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	AT	ANN
P(mm)	20.85	35.66	13.72	9.59	15.28	12.51	22.66	15.71	17.89	7.3	4.29	10.52	186
ETPC (mm)	106.7	58.8	23.9	12.7	10.9	18.6	36.6	56.0	97.0	150.9	206.3	182.1	961
Variations (mm)	-85.85	-23.14	-10.18	-3.11	4.38	-6.1	-13.94	-40.29	-79.11	-143.6	-202.01	-171.58	-744.53
R.U (mm)	00	00	00	00	4.38	00	00	00	00	00	00	00	4.38
ETR (mm)	20.85	35.66	13.72	9.59	10.9	12.51	22.66	15.7	17.89	7.3	4.29	10.52	181.59
Déficit (mm)	85.85	23.14	10.18	3.11	00	6.1	13.94	40.29	79.11	143.6	202.01	171.58	778.91
écoulement	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00

5.2.3. Déficit d'écoulement :

Le déficit d'écoulement est la différence entre la pluviométrie tombée sur un bassin versant et le total de la quantité d'eau écoulée, plusieurs méthodes ont été proposées pour le calcul du déficit, mais seulement la méthode de Verdeil qui nous donne une valeur proche de la réalité du déficit d'écoulement.

5.2.4 Méthode de Verdeil :

L'abaque de Verdeil (figure 10) donne directement les valeurs du déficit d'écoulement (mm) en fonction des précipitations moyennes annuelles

$$P = D + Q$$

P : précipitations moyennes annuelles

D : déficit d'écoulement (Abaque de Verdeil) = 182mm

Q = Ecoulement

$$Q = P - D$$

Q = 186.04 - 182 = 4.04mm (englobant le ruissellement et l'infiltration (figure suivante)).

CLIMATOLOGIE

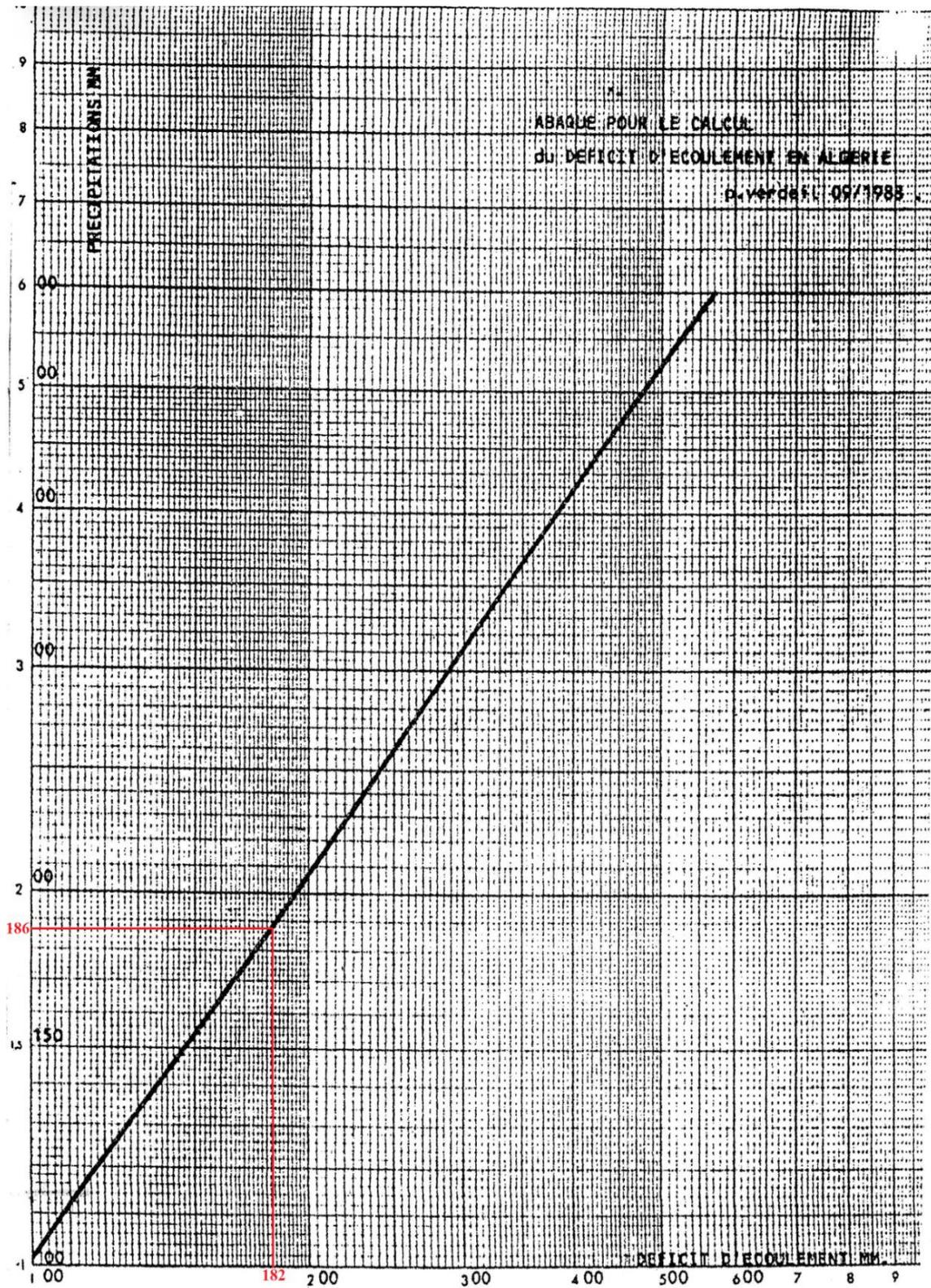


Figure 10: Abaque de Verdeil (09/1988) Calcul du déficit d'écoulement en Algérie

Conclusion :

Le secteur étudié forme une dépression localisée dans la partie centrale des Monts des Ksour qui constituent une barrière topographique et climatique d'orientation SW-NE entre les Hautes plaines et la plateforme saharienne.

Le climat désertique du secteur étudié est caractérisé par une température moyenne annuelle de 18.09°C et des précipitations moyennes annuelles de 186.04 mm.

L'étude des régimes climatique montre que l'Automne et le printemps constituent les saisons la plus pluvieuses et l'été la saison la plus sèche.

Les indices climatiques d'Emberger et De Martonne présentent un climat saharien à hiver frais.

Tous ces facteurs, très favorables à une évaporation intense jouent un rôle fondamental dans le cycle des eaux de la région.

CHAPITRE II

Géologie

1- Cadre géologique générale :

L'atlas saharien forme une chaîne montagneuse d'une longueur d'environ 1000 Km orientée SW-NE situé dans la partie nord de l'Algérie et s'interpose entre deux domaines stable : - les hautes plaines oranaises, au Nord Le domaine saharien au sud ; Cette suite de chaînes forme une barrière naturelle géographique et climatique. Il s'agit d'un ensemble structural étendu depuis le Maroc à l'Ouest jusqu'en Tunisie à l'Est.

Ce domaine est affecté par deux grands accidents ;

- Au Nord par l'accident nord-atlasique (Accident sud-mésétien au sens de KAZITANI, 1986).
- Au Sud par l'accident sud-atlasique appelé «flexure Sud Atlasique » allant d'Agadir au Maroc jusqu'à Gabès en Tunisie.

La partie occidentale de l'atlas saharien (les monts des ksour) est limité par les hautes plaines oranaises au Nord, la plaine saharienne au Sud, à l'Est par les monts des Amours et à l'Ouest par le haut Atlas Marocain.

2- Cadre géologique du secteur d'étude :

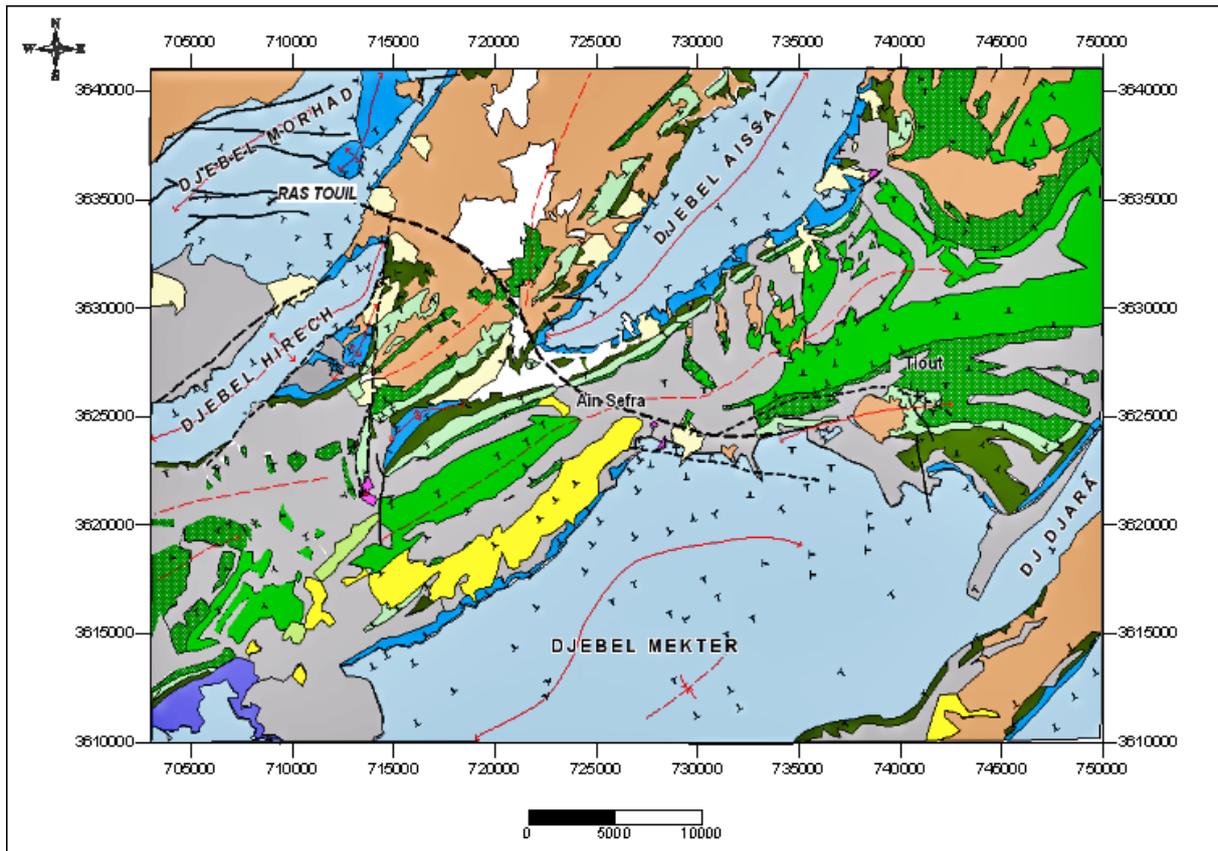
Ain Sefra est située entre deux anticlinaux l'un au Nord et l'autre au Sud encadrent le synclinal, ils y affleurent des terrains gréseux plus anciens : Jurassique supérieur et Crétacé inférieur, ces anticlinaux ont donné naissance aux Djebel Aïssa et Djebel Mekther.

La limite SW du synclinal d'Ain Sefra est bien marquée, il s'agit de la zone disloquée NS renfermant les ophites et le Trias d'El Hendjir. La zone reliant Tiloula à Koudiat Tiourtalt constitue une séparation structurale avec le synclinal de Tiourtalt.

La première partie de ce synclinal se situe entre El Hendjir et Ain Sefra le flanc étant fortement masqué par les dunes d'Ain Sefra.

La deuxième partie du synclinal se trouve à l'ENE d'Ain Sefra dans la région de Tiout plus connue sous le nom de Maader (qui fait l'objet de notre étude), c'est un synclinal typique des monts des Ksour à fond plat affectant l'Albien encadré par les anticlinaux jurassiques de djebel Aïssa et Djara.

GEOLOGIE



LEGENDE	
Quaternaire: Formations dunaires	Néocomien Unité 2
Quaternaire: Alluvions	Néocomien Unité 1
Quaternaire: Alluvions anciennes	Transition Infra-Crétacée
Quaternaire: Pieds, colluvions	Jurassique supérieur
Tertiaire Continental	Jurassique moyen
Cenomano-Turonien	Trias
Albien: Grés de Tiout	Faillle
Barrem o-Aptien	Anticlinal
	Synclinal
	Pendage

Figure 11: Carte géologique de la région d'Ain sefra
(GALMIER 1972, digitalisé)

3- Aperçu géologique

Dans la partie occidentale de l'Atlas Saharien (monts des Ksour); les affleurements sont caractérisés par les formations d'âge mésozoïque avec des épaisseurs relativement plus importantes à l'Est. Les formations sédimentaires les plus récentes (Tertiaires et Quaternaires) reposent en discordance sur les formations du Secondaire.

Les niveaux gréseux (Jurassique supérieur à Crétacé inférieur) prédominent et constituent la majeure partie des montagnes (Aïssa, Mekther, Djara, Morghad, Djeraouine, etc...) (KACEMI, 2005).

3.1 Le trias :

Le trias se présente dans l'Atlas saharien sous forme de diapirs, néanmoins, il est reconnu en place par des forages exécutés par sonatrach (KAZI-TANI, 1986). Le trias de type germanique, c'est-à-dire de nature évaporitique, apparaît en diapir ou en pli diapir (exemple du diapir d'Ain Ouarka) au cœur des structures anticlinales, on les considère comme des « appareils diapiriques ».

Il est constitué d'argiles bariolées gypsifères à minéraux. Parmi ces derniers on note le quartz pyramidé, de l'oligiste, de la calcite, de la pyrite, de l'amphibole etc. Parmi les évaporites, le gypse est un élément, fréquent en cristaux maclés fer de lance, fibreux, en amas saccharoïde, hyalin- grisâtre ou rosâtre. On trouve dans les argiles triasiques des lambeaux, des blocs de types pétrographiques variés.

3.2 L'Infra lias :

Il est à noter que l'Infra Lias est un terme introduit par Flamand en 1911 pour désigner une formation de dolomie franche ou de calcaire dolomitique à inter lits argileux. Dans les monts des Ksourles dépôts de cet étage n'ont jamais été trouvés en place dans l'Atlas saharien. Sauf, au Djebel Mellah de Mécheria à Dir Ech Chémakhem (carte topographique de Mékalis au 1/100.000, x=239.2, y=289.7) ou ils ont été découverts par Flamand et seraient constitués de calcaire siliceux. Ces affleurements ont été étudiés en détail par Bassoullet en 1973.

D'autres dépôts sédimentaires fragmentaires flottent dans les argiles des diapirs D'El Hanjir et de Tiout. Ils sont constitués de calcaire dolomitique gris bleuté d'âge Rhétien à Hettangien probable (Bassoullet, 1973).

Notant que ces dépôts sédimentaires Rhétiens scellent le complexe volcano-évaporitique dans les diapirs étudiés. Ils sont postérieurs aux dernières émissions volcaniques de la région des Monts des ksour.

3.3 Le jurassique :

Les affleurements du Lias sont peu nombreux dans l'Atlas saharien et on doit leur découverte à J.P Flammand au Dj MelahDj.Souiga, Dj. Chamarikh et dans le chaînon d'Antar-Guettai « Atlas saharien Occidental ». Le Lias est composé essentiellement de deux ensembles :

- Un Lias inférieur et moyen dolomitique et calcaire ;
- Un Lias supérieur plus marneux.

La base du Lias est constituée de petits bancs dolomitiques gris-jaunâtres à gris foncés et des passées argileuses jaunâtres à rouges.

Le Lias inférieur et moyen sont composés de dolomies claires, de calcaires et passées marneuses et argileuses de couleur lie de vin.

La partie inférieure du Lias est composée essentiellement de dépôts de plate-forme peu profonds avec des dolomies claires à grises en plaquettes, d'épaisseur décimétriques, bien litées, parfois accompagnées d'un faciès à stromatolithes très développé au Dj Melah et Souiga. Au-dessus, on rencontre les calcaires clairs à gris foncés en bancs décimétriques à métriques avec des débris bioclastiques variés.

Le lias supérieur marneux, est constitué d'une alternance de bancs calcaires décimétriques, de teinte claires à gris foncé et des passées marneuses et argileuses lie de vin. Cette série peut être attribuée à un milieu plus profond que le précédent et se situerait plus au large sur la plateforme.

3.3.1 Le Dogger (jurassique moyen) :

Le jurassique moyen est caractérisé par l'abondance des éléments terrigènes, la prédominance des éléments argileux dans la partie inférieure, l'augmentation de la fréquence des grés au sommet et par une grande épaisseur.

A L'Aalénien-Bajocien moyen, la sédimentation est caractérisée essentiellement par des dépôts marno-calcaires et une faible épaisseur de l'ordre de 100 mètres. Ces dépôts comprennent des calcaires à inter lits argileux et des marnes et calcaires au sommet à la base, les calcaires sont noduleux, de teinte gris clair et des inter-lits d'argiles lie de vin ou de

marne grises. Au-dessus de cette série se déposent des calcaires noduleux, des calcaires argileux gris et des marnes grises.

On remarque, que durant cette période, les facies gardent les mêmes caractères lithologiques qu'au Lias supérieur qui définissent un milieu relativement profond de type sillon.

Le Bajocien supérieur est caractérisé par une puissante formation terrigène. Cette formation est constituée d'une alternance de marnes et d'argilites, de grès et de calcaires. A la base, cette série est plus carbonatée et admet des passées de calcaires argileux de teinte jaunâtre à grise, et au sommet, les argiles deviennent très peu carbonatées.

Au Bathonien, les grès sont de plus en plus abondants et se présentent en bancs de quelques décimètres à quelques mètres d'épaisseur.

Cette série est constituée d'une alternance de grès, de marnes et de calcaires gréseux bioclastiques et oolithiques. A la base de cette formation, les calcaires gréseux sont bioclastiques, et oolithiques à stratifications obliques dans sa partie supérieure.

Au-dessus de cette série se place une formation très puissante, constituée d'une alternance de grès, d'argilites et de dolomies en bancs décimétriques très dispersés.

En conclusion à partir du Bajocien moyen, la sédimentation est marquée par des apports détritiques de plus en plus importants, ce qui caractérise une diminution de la profondeur et une subsidence importante.

3.3.2 Malm :

Au jurassique supérieur se développe une puissante série, presque entièrement détritique. Cet ensemble puissant atteint 1500m d'épaisseur ; il caractérise une période de comblement et la plate-forme marine du Dogger par des apports détritiques.

Cet ensemble est composé d'une première formation qui débute par de grosses barres gréseuses de 30 à 40 m de puissance en alternance avec des passées d'argilites pélitiques gréseuses de couleur lie-de-vin, violacées ou verdâtres.

Les grés sont de couleur claire à stratifications obliques. La base des bancs remanie souvent des galets d'argilites. Au-dessus, on rencontre, une puissante série de grès clairs de même nature que les grés précédents, mais avec une seule passée d'argilites lie de vin d'une dizaine de mètres, avec une épaisseur globale qui peut atteindre 500m.

Au-dessus, se place une autre puissante formation atteignant plus de 600m d'épaisseur, comprenant une alternance de marnes, d'argiles, de grès et de petits bancs dolomitiques.

La base de cette formation est à prédominance argileuse de teinte verdâtre ou violacée. Les grés se présentent en base de 1 à 2 m d'épaisseur à stratifications oblique ou

GEOLOGIE

en lits centimétriques de couleur grisâtre et à patine beige ou noirâtre. Les dolomies se présentent en minces passées centimétriques de teinte jaunâtre.

Dans la partie supérieure, les bancs de grés sont plus abondants et plus épais, pouvant atteindre 30m d'épaisseur, à stratifications Obliques, feuilletés, de teinte claire à rose violacée.

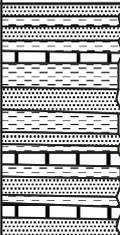
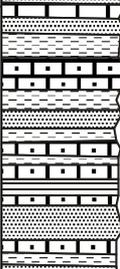
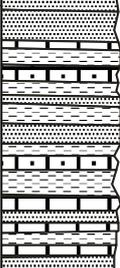
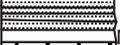
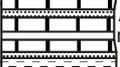
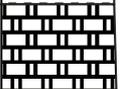
Etage	Formation	Epais	Colone lithologique	Description lithologique
Oxfordien Callovo Bathonien Sup	Djara	470m		Grés siliceux à stratification oblique dans les argiles et de rares bancs dolomitiques
Bathonien inf Bajocien Sup	Tifkirt	540m		Calcaires dolomitiques à oolithes Argiles Alternance calcaire, grès, argile et calcaires, oolithiques et lumachelliques Récifs
Bajocien supérieur	Teniet El Klakh	500m		Marnes vertes entrecoupées par des niveaux de calcaires sublithographiques et oolithiques Alternance d'argiles et de grés
Aaléno-Bajocien	B. De Reknet El Kahla	95m		Grès furigineux à micro fssurations entrecroisées.
Toarcien Aalénien	M.C de Ain Rhezala	110m		Marnes grise avec intecalation de niveau de calcaire Alternance de mame et de calcaires blanchâtres riche en Ammonites, filaments et Zoophycos
Domérien sup Sinemurien	Alternance de Ain Ouarka	170m		Alternance de marnes et calcaires
Sinemurien Hettangien inf	Dolomie de Chemarikh	200m		Calcaires dolomitiques à débris d'organismes et nodules de silex
Trias (Keuper)		+ de 250 m		Argiles bariolées de basaltes, gypse et de roches vertes

Figure 12 : coupe lithostratigraphique des formations du Lias et Dogger dans la partie centrale des Monts des ksour (Douihasni, 1976)

3.4 Jurassique supérieur - Crétacé inférieur :

Le passage de la « Formation de Djara » à la « Formation de Aïssa » n'est pas net. Il est marqué uniquement par la disparition de la dolomie et une discontinuité (HG au sommet des grès) marquant la fin d'une séquence régressive (argiles-grès). La limite supérieure est beaucoup plus nette, elle est caractérisée par la disparition des gros bancs de grès et l'apparition des argiles et de la dolomie.

3.4.1 La formation d'Aïssa (Bassoulet, 1973) :

« Aïssa » est le nom d'une montagne située au nord de la ville d'Ain Séfra. Elle est limitée par Dir El Hairach et Garet Debba au SW et Djebel Tifkirt au NE. Ce Djebel représente le point culminant des Monts des Ksour (2236m). C'est un grand anticlinal orienté SW-NE à faciès essentiellement gréso-argileux et d'âge Jurassique supérieur.

C'est une formation de 623m d'épaisseur entièrement argilo gréseuse. Elle est subdivisée en deux membres :

a- Membre inférieur ou membre des alternances espacées (304m) : ce membre est généralement constitué d'argiles et d'argiles silteuses, de couleur verdâtre ou lie de vin. Ces argiles sont parfois intercalées par des grès en plaquettes à grains fins de couleur blanchâtre. Ce membre peut être subdivisé en deux termes A et B ; en fonction de la présence ou l'absence des niveaux de dolomies.

a.1 Terme A (144m) : ce terme est caractérisé par la présence de quatre bancs dolomitiques très espacés de 0,40 à 1m d'épaisseur, à litages obliques, obliques mamelonnés, entrecoupés et parfois madrés et à fentes de dessiccation à leur sommet.

a.2 Terme B (160m) : il est constitué par une alternance d'argiles et de grès, à prédominance argileuse. Le faciès argileux peut atteindre 30m d'épaisseur. Nous notons la disparition de la dolomie.

b-Membre supérieur ou membre des alternances rapprochées (333m) : il est caractérisé par la rareté des argiles. Les bancs de grès peuvent être d'une épaisseur d'une soixantaine de mètres. La partie supérieure de ce membre est caractérisée par la couleur rosâtre des grès et la présence de dragées de quartz. Cette formation serait d'âge jurassique supérieur (Kimméridgien-Portlandien) (Bassoulet, 1973)

Ce membre a été subdivisé en deux termes C et D, selon les couplets d'argiles et de grès qui sont plus serrés en C et beaucoup plus gréseux dilatés et chenalisés en D.

b.1 Terme C (200m) : il est constitué d'une alternance d'argiles pélitiques lie de vin et de grès blanchâtres. Ce terme est caractérisé par la faible épaisseur des argiles, donnant ainsi des couplets en forme d'alternances rapprochées.

b.2 Terme D (133m): ce terme est caractérisé par la quasi-disparition des argiles. Quand elles existent, elles ne sont que des joints centimétriques. La couleur des grès prédominants devient rosâtre et nous notons l'apparition des dragées de quartz de 3 à 8mm de diamètre, qui peuvent atteindre 1,50cm dans des bancs rougeâtres lenticulaires de 0,40 à 1m d'épaisseur qui suivent les directions préférentielles des grandes stratifications obliques. Les épaisseurs des grès peuvent atteindre 55m ; ils sont massifs à grains moyens à grossiers de 0,4 à 1mm et à galets mous surtout à la base et varient latéralement. Ceci suggère une chenalisation très marquée, avec un ravinement à la base des bancs.

3.4.2 La «Formation de Tiloula» (556m) :

Définie par J. P. Bassoullet (1973) dans une coupe levée à AïnTiloula (source située sur le flanc sud-est de Djebel Aïssa), elle est constituée d'une alternance d'argiles (vertes et rouges), de grès à teinte variée et de petits bancs de dolomie qui sont présents dans la partie inférieure et disparaissent dans la partie supérieure.

Le début de cette formation est marqué par un passage bien net dans la nature; il s'agit de bancs de dolomies centimétriques, des argiles vertes et rouges et de grès dans une zone déprimée d'épaisseur plus ou, moins importante.

Cette formation a été subdivisée en deux membres : un membre inférieur et un membre supérieur.

a. Le membre inférieur (316m) :

a.1 Le terme A (126m) :

Il est caractérisé par une alternance de grès et d'argiles, à dominance gréseuse. Il débute par des argiles rougeâtres de 3m d'épaisseur, intercalées par des petits bancs centimétriques (10 cm à 70 cm) de dolomies de couleur mielleuse.

GEOLOGIE

Les grès sont de couleur marron, à grains fins à moyens, d'épaisseur métrique (2m à 13m), ils sont riches en figures sédimentaires (arêtes de poisson et HCS). Parfois ces grès sont intercalés par des petits bancs dolomitiques.

Ce terme est terminé par un banc de grès en plaquettes de 8m d'épaisseur à surface supérieure ferrugineuse (hard ground).

a.2 Le terme B (190m) :

Ce terme est caractérisé par une alternance de grès et d'argiles à dominance argileuse. Les argiles sont d'épaisseur décimétrique de couleur rougeâtre à la base et verdâtre au sommet, intercalées par des petits bancs centimétriques de dolomie de couleur mielleuse parfois jaunâtre.

Les grès sont généralement massifs d'épaisseur de 2m à 8m à grains fins de couleur marron clair propre. Dans certains cas les grès sont d'épaisseur centimétrique (10cm à 50cm). Ce terme se termine par des argiles vertes de 20m intercalées par un petit banc de dolomie et de grès caractérisé par des figures sédimentaires telles que les «flaserbedding», ce sont les grès de Tiloula, (Kacemi 2005).

b. Le membre supérieur (240m)

b.1 Terme C(40m)

Ce terme est constitué d'une alternance de grès et d'argiles, à dominance gréseuse. Les grès sont en plaquettes d'épaisseur métrique (4m à 10m) de couleur marron clair à grains moyens. Ces grès sont en alternance avec des argiles rougeâtres de faible épaisseur centimétrique (80cm).

b.2 Terme D (100m)

Ce terme est représenté par d'argile de couleur rougeâtre parfois verdâtre d'environ 90m d'épaisseur intercalée par de rares petits bancs de dolomies de couleur jaunâtre lumachelliques, ce terme se termine par un banc de grès (10m) massifs et en plaquettes de couleur clair et marron à grains moyens à surface supérieure ferrugineuse (hard ground) et est caractérisé par des figures sédimentaires.

b.3 Terme E (74m)

Il est constitué par des argiles de couleur rougeâtre de 68m d'épaisseur intercalée par des bancs de grès centimétriques de couleur claire à grains fins à moyens. Il contient de la minéralisation cuprifère (la malachite). Ce terme met fin à la «Formation de Tiloula».

3.4.3 La formation de Tiout :

La « Formation de Tiout » a été définie par J. P. Bassoullet (1973) relativement au village de Tiout. Elle est d'âge Barrémien - Aptien - Albien. Elle est appelée aussi « groupe de grès à dragées » par Douihasni 1976. C'est une très puissante formation de 1065 m d'épaisseur environ, cette masse principale de grès présente un faciès assez caractéristique, quoique pas toujours différenciable des autres étages gréseux.

La limite inférieure : elle est marquée par l'apparition de niveaux gréseux de grandes épaisseurs de couleur rosâtre qui sont d'ailleurs un repère net dans le paysage. Ces grès sont à grains moyens à grossiers et à dragées de quartz.

La limite supérieure : elle n'est pas discernable dans cette coupe malgré que les grès supérieurs affleurent dans ce secteur de Tiout (au niveau de l'axe du synclinal de Tiout, entre GaretSmail au Nord et Dalâa de Tiout au Sud).

Le synclinal d'Ain Safra est formé uniquement de ces grès, qui débutent au pied du Dir El Hirech, et se prolongent au centre de part et d'autre de la route de Ain Sefra –El Hendjir. Sur l'autre flanc, on les retrouve au niveau de l'Oued Bredj.

On peut estimer que cette formation occuperait une largeur de 10Km le long de l'axe à partir de la faille d'El Hendjir avec une largeur d'environ 1200m au niveau d'Ain Skhouna et de 1500m au Sud-Est d'El Hendjir, au niveau d'Ainsefra on a un rétrécissement de ce synclinal.

3.5 Cénomaniens inférieurs (formation des marnes à gypse)

Essentiellement marno-gypseuse avec des intercalations de niveaux décimétriques de calcaires dolomitiques à la base, et de puissants bancs gypseux (2 à 6m) à sa partie supérieure, la formation de marnes à gypse a été attribuée au Vraconien et au Cénomaniens inférieurs par corrélation avec les séries du Djebel Amour.

3.6 Le Cénomaniens supérieur – turonien

Daté grâce à une faune de gastéropodes et d'oursins, le Cénomano-turonien du Djebel Khondjaia paraît formé :

- De calcaires dolomitiques en bancs décimétriques à gastéropodes d'âge Cénomaniens supérieur,
- D'une alternance de marnes et de calcaires en bancs décimétriques à gastéropodes et oursins (Turonien inférieur),
- De calcaires dolomitiques massifs (Turonien supérieur).

3.7 Les formations post-turonien

La série post-turonien apparaît essentiellement constituée par des sédiments continentaux détritiques généralement non stratifiés. Les dépôts se montrent discordants, soit sur les formations turonien, soit sur celles du Barrémo-albo-aptien, comblent les dépressions.

La Série post-turonien comporte, d'après BASSOULET (1973).

- _ Des formations terrigènes constituées de blocs détritiques rapportés à l'Oligo-miocène par FLAMAND (1911) et au Tertiaire basal par CORNET (1950).
- _ Des couches rouges argilo-gréseuses, entrecoupées de niveaux gypsifères (djebel BouAmoud, Djebel Gharbi), cette série a été attribuée au Mio-pliocène.

Dans le secteur étudié, les couches rouges constituent le remplissage de la dépression de TirKount et peuvent atteindre des épaisseurs de 100 à 150 mètre

- Des conglomérats hétérométriques, cimentés généralement calcaires (plaine de Tiout, Djebel Khoundjaia). Cette formation d'une épaisseur de 30m, appelée « Poudinques des ksours » est rapportée au Pliocène,
- Une carapace calcaire correspondant à la croute Villafranchienne de DURAND (1952), formant une dalle horizontale d'une grande épaisseur.

3.8 Le Quaternaire

Dans la région d'Ain-sefra, le Quaternaire est représenté par plusieurs types de dépôts.

Les limons anciens

C'est une alternance de limons fins et de conglomérats pouvant renfermer des dépôts gypso-salins, cette série a été attribuée au Plio-Quaternaire et au Quaternaire ancien.

Les tufs et travertins

Les tufs et travertins localisées à proximité des sources sont généralement liés à des accidents tectoniques.

Les alluvions de piedmonts

Ils sont représentés par des dépôts de pente constitués de cailloutis cimentés par des carbonates.

Conclusion :

Ce secteur est caractérisé dans sa terminaison périclinale SW par des dépôts triasique infraliasique (Kacemi, 2005) et par des grès de couleur claire (SSE d'Aoumet El Menndil, l'anticlinal de Djebel Djara au SSW, le flanc nord de l'anticlinal de Djebel Mekther. Ce sont les dépôts de la « Formation d'Aïssa » et une partie de la « Formation de Tiloula ».

Le cœur du synclinal est caractérisé par une large extension des dépôts détritiques rougeâtres correspondant à une partie de la « Formation de Tiloula » et la « Formation de Tiout ».

CHAPITRE III
Hydrogéologie

1- Introduction :

L'étude géologique (lithostratigraphique, structurale) a permis de localiser les formations et les zones propices à l'existence des eaux souterraines.

L'étude sur les propriétés hydrodynamique du système aquifère de notre région d'étude a été réalisée en se basant, d'une part sur l'établissement de la carte piézométrique et son interprétation, et d'autre part, sur la détermination des différents paramètres hydrodynamiques (transmissivité, perméabilité etc...).

2- CADRE HYDROGEOLOGIQUE DE LA REGION :

La région est caractérisée par une série de synclinaux et d'anticlinaux plus ou moins parallèles de direction générale Sud Ouest – Nord Est. Les anticlinaux, en général très surabaissés et les synclinaux ont souvent un fond plat. On passe de l'un à l'autre par une zone très inclinée ou flexure dans laquelle les formations sont très redressées, étirées ou faillées. Parmi les zones déprimées, on prendra en considération celles ayant des impacts directs sur les ressources en eaux des Monts des Ksour.

2.1 - Synclinal d'Aïn Séfra :

Les formations à matrice gréseuse dominant et sont souvent entrecoupées de bancs argileux, diminuant localement la perméabilité. C'est dans les grés aquifères du Barrémo-alboaptien que les ressources en eaux sont les plus importantes

Deux anticlinaux, l'un au Nord (Djebel Aïssa) et l'autre au Sud (Djebel Mekhter) encadrent le synclinal. Ils y affleurent des terrains gréseux plus anciens Jurassico-Crétacés. La limite Sud Ouest du synclinal est bien marquée. Il s'agit de la zone disloquée Nord - Sud renfermant les ophites et le cortège Triasique d'El Hendjir. La zone reliant Tiloula à Koudiat Tiourtalt constitue une séparation structurale avec le synclinal de Tiourtalt.

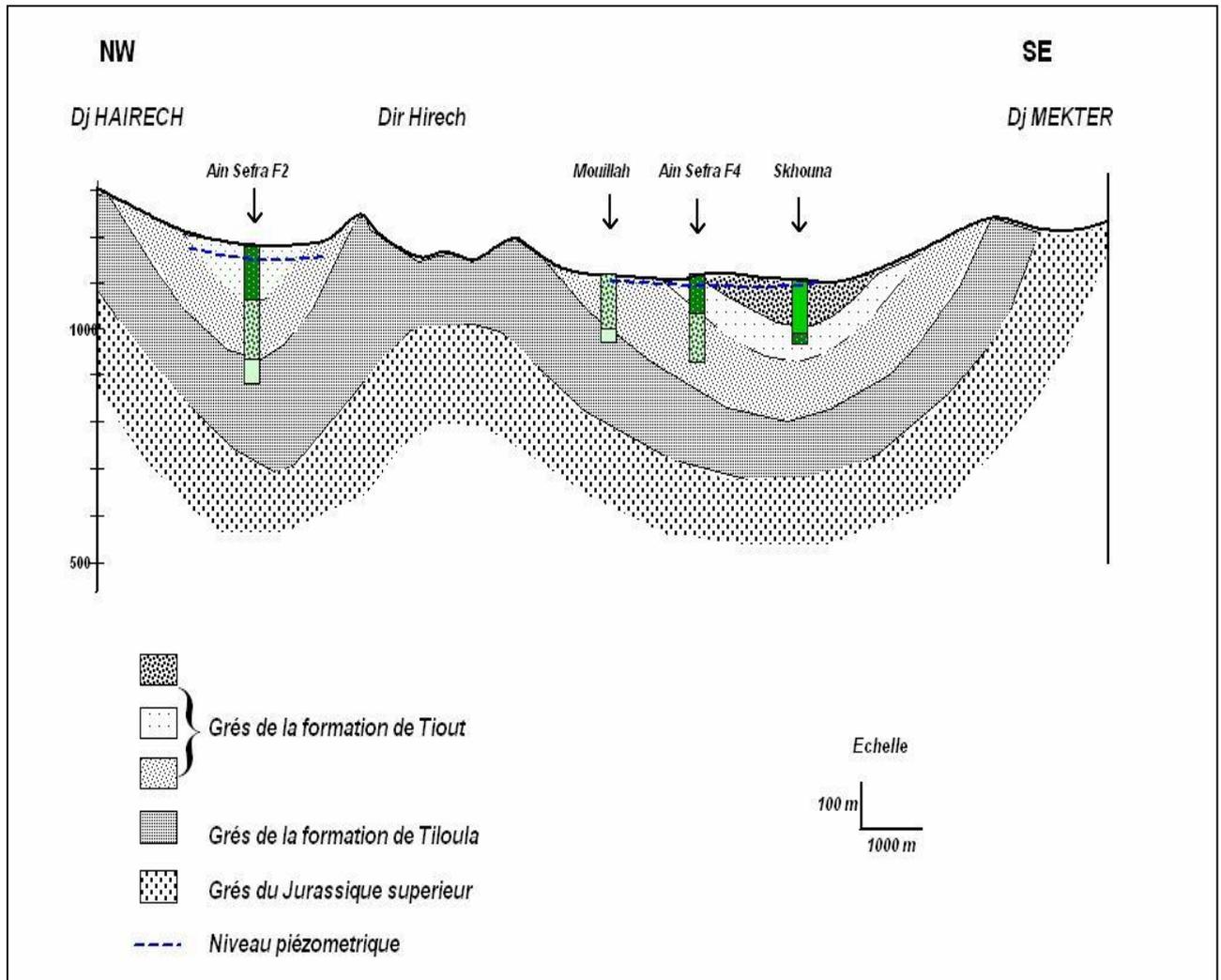


Figure 14 : Coupe hydrogéologique schématique (Rahmani 2010)

2.2 - Synclinal de Tiout (Maâder) :

Constitue la deuxième gouttière du synclinal d'Aïn Séfra. Elle se trouve dans la région de Tiout, au Nord Est de la ville d'Aïn Séfra, plus connue sous le nom de Maâder. C'est un synclinal typique des monts des Ksour, à fond plat, d'âge Albien, encadré par les anticlinaux des Djebels Aïssa et Djara.

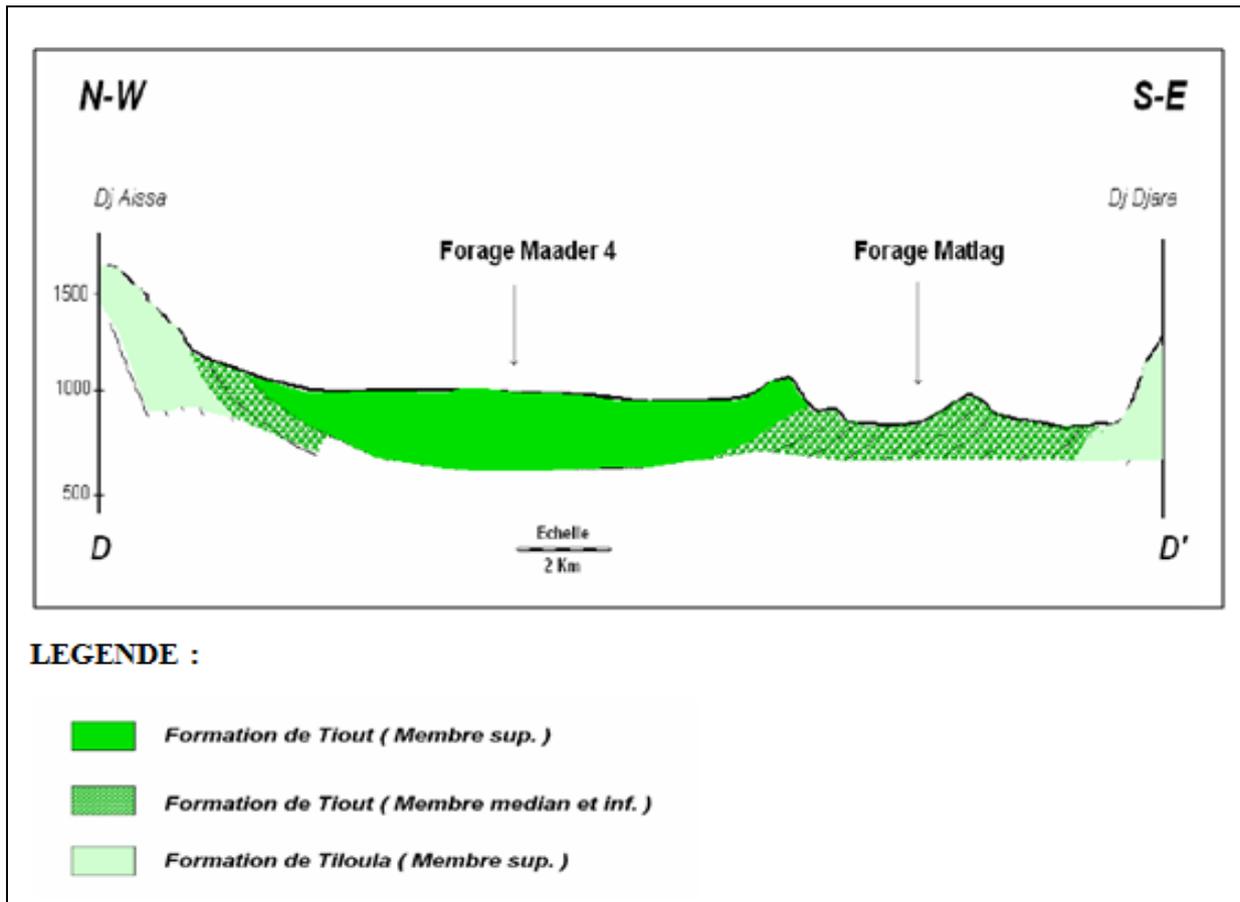


Figure 15 : Coupe géologique Djebel Aïssa – Maâder – Tiout (Mansour 2007)

3 - Les structures de Tiout - Aïn El Hadjadj – Asla :

3.1 - Les structures de Tiout :

Au Nord Est de la petite localité de Tiout, s'étend le synclinal de Botmet Oum El Habel orienté Est – Ouest et dont le fond est constitué par les grés à dragées supérieurs. Ce synclinal dissymétrique présente un étranglement vers le Sud Ouest, aux environs de Tiout (émergence des sources de Tiout) et s'étale par contre vers le Nord Est à El Ghouabi. Le cœur du synclinal est découpé par des fractures majeures . Essentiellement liées aux plissements. Le flanc Sud présente un diaclasage caractéristique donnant aux assises albiennes un débit en gros bancs pseudo-cubiques que l'on peut voir le long de la route Aïn Séfra – El Bayadh

3.2 - Les structures de Koudiat Tiourtelt :

Le secteur de l'oued Tiourtelt appartient à un système de deux anticlinaux séparés par le synclinal de Tiourtelt dont l'exutoire n'est autre que la source qui porte le même nom. L'anticlinal de Koudiat Tiourtelt, pincé et à flancs écaillés est faillé longitudinalement. Il est injecté de Trias masqué à cet endroit par les poudingues des Ksour. Le synclinal dont le fond est constitué par les grès à dragées supérieurs s'intègre dans la série des structures orientées Sud Ouest – Nord Est.

3.3 - Les structures de Dalaâ Miloudah :

Au Sud de l'anticlinal du Djebel Afzouz d'Asla, s'étale une grande cuvette complexe dans le détail, qui affecte la formation à composante argileuse de Tiloula. Encadrés par les barres Barrémiennes où un système d'accidents décrochants détermine des plis secondaires mis en évidence à Dalaâ Miloudah, orientés sensiblement Nord 10° à Nord 20° Est.

4 - Les formations aquifères :

Les faciès qui prédominent largement dans cette région, sont les formations gréseuses souvent intercalées par des bancs argileux

4.1- La nappe du Jurassique :

Malgré l'importance des aires d'affleurement du Jurassique, aucune nappe importante n'a été mise en évidence dans cette formation. Il existe certes quelques points d'eau, mais sont d'un débit insignifiant exception faite à quelques points d'eau à proximité du sommet du Djebel Aïssa.

4.2- La nappe Barremo-Albo-Aptienne :

Elle constitue la principale ressource de la région, exploitée par un grand nombre de points d'eau. Trois horizons gréseux différents ont été mis en évidence par (Gousskov, 1942) qui sont séparés par des couches imperméables. C'est le niveau moyen qui semble être le plus riche. Les grosses sources de la région constituent les exutoires naturels de cette nappe. Dans la région étudiée l'Albien se situe dans plusieurs bandes parallèles plus ou moins larges.

Les assises gréseuses contiennent trois nappes, séparées par trois niveaux imperméables. Ces trois nappes se manifestent par les trois principales sources de la région :

- un premier niveau dont les grès massifs de la base de l'étage. Les sources alimentées par ce niveau sont plus nombreuses et peu importantes. L'Ain Tassala est considérée comme étant l'exutoire de ce niveau inférieur.
- un deuxième niveau correspondant à une masse de grès grossiers homogènes (grès à dragées d'une épaisseur d'environ 300m). Ce niveau moyen fournit les plus grosses sources de la région comme la source de Tiout (Ain Messaoud).
- un troisième niveau qui n'est pas représenté dans le synclinal d'Ain Sefra lui-même, mais dans son prolongement vers le NE près de l'oued Tiourtalt.

4.3- La nappe du Quaternaire :

- Les dépôts alluvionnaires : des principaux oueds constituent de bons réservoirs lorsque leur étendue et leur puissance sont importantes.
- Les dépôts dunaires : la dune d'Ain Sefra contient elle aussi une nappe aquifère qui se manifeste par quelques sources pérennes au bord de la ville (source de la dune). La nappe dunaire est certainement en communication avec celle des terrasses, qu'elle doit suralimenter en certaines périodes.

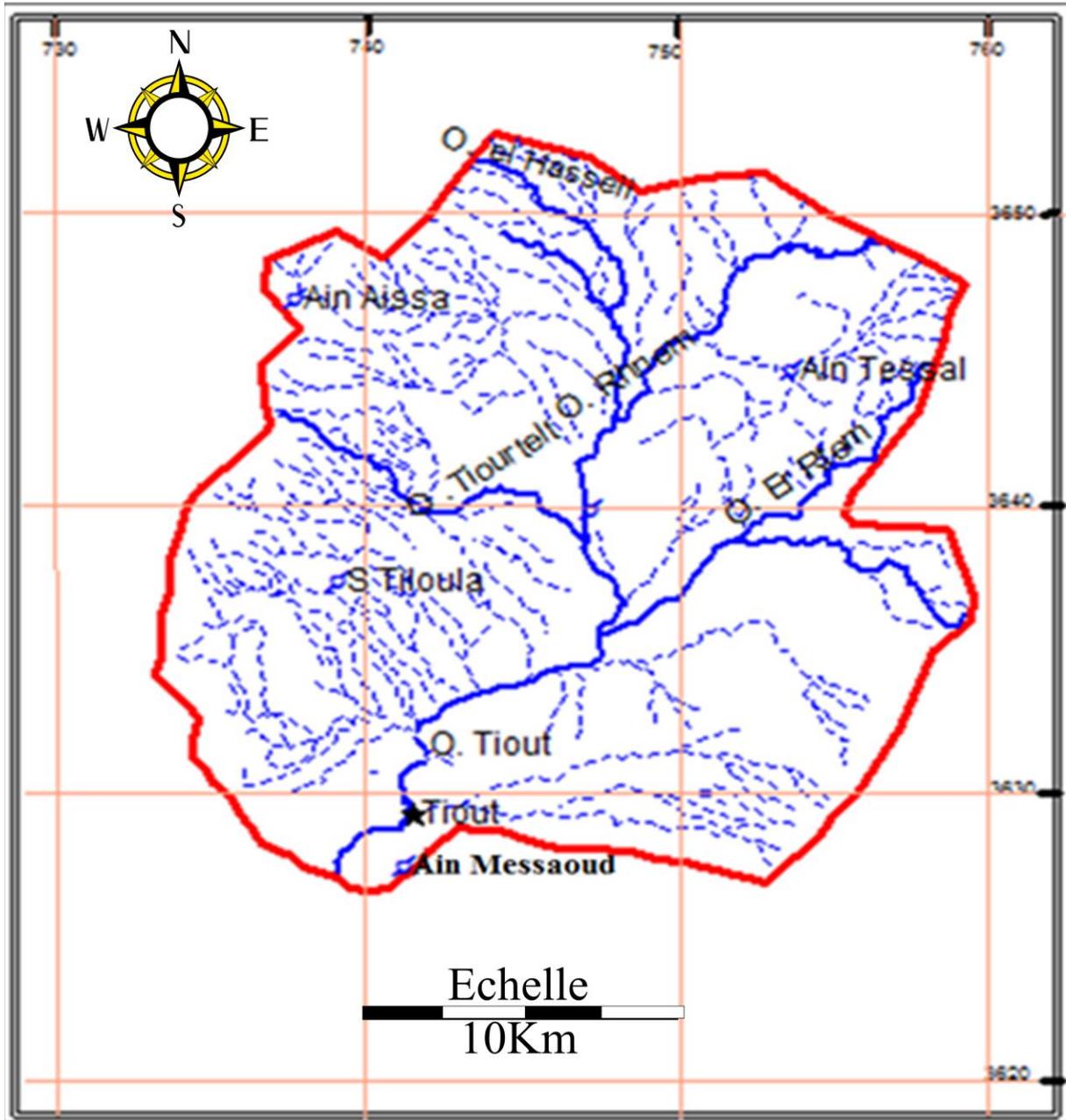
5. Bassin versant de Tiout :

L'oued Tiout est la principale ressource superficielle dans la région d'étude avec un relief qui favorise l'infiltration. Du fait de la présence de nombreux massifs, les oueds sont canalisés dans les dépressions contournant les monts des Ksour pour se diriger vers le Sud. Les principaux oueds sont (figure 16) :

Oued Tiout qui reçoit les eaux d'Oued Elhasseii, Oued Tiourtelt, Oued el Rnhem qui draine les versants Sud du Djebel aissa.

Oued El Rhem qui draine les eaux du Djebel Djaara .

HYDROGEOLOGIE



- - - Cour d'eau
- Cour d'eau principale
- Q Source
- Limite de bassin

Figure 16 : Réseau hydrographique de la région de Tiout

6 - LES SOURCES

6.1 - Ain Tessala :

Située à 33 km au Nord Est de Ain Séfra, la source d'Ain Tessala émerge avec un débit d'environ 5 l/s au pied de Delaâ Tessala, corniche de grés Albien. Elle est composée de plusieurs sources groupées dans une série d'alternance de sables jaunâtres et de marnes rougeâtres probablement d'âge Albien. Les émergences sont séparées par la corniche Albienne de Delaâ Tessala par un vaste affleurement de roches volcaniques dans un état d'altération avancé.

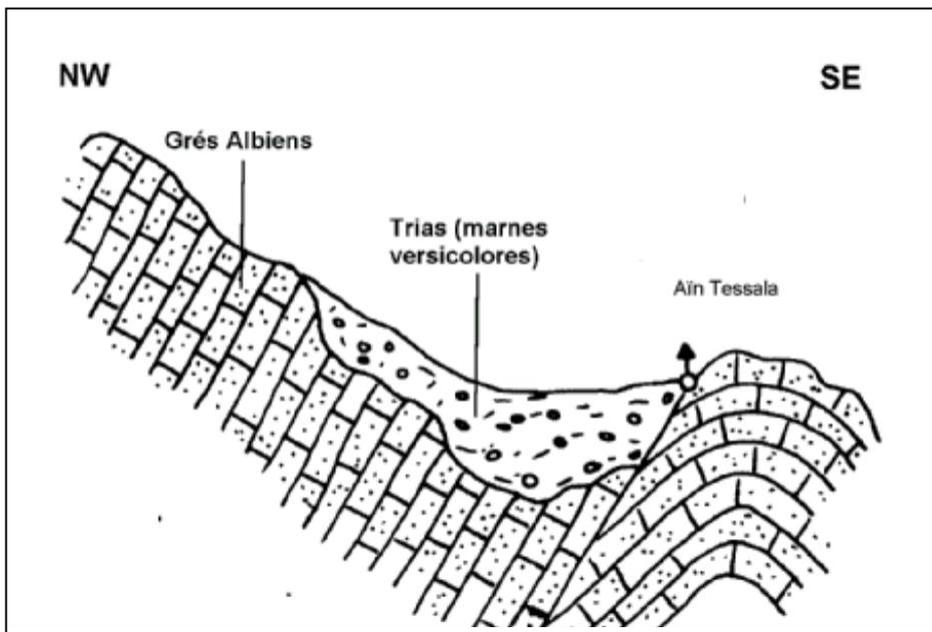


Figure 17: Coupe schématique montrant les conditions d'émergence de Ain Tessala (MANSOUR 2007)

6.2 - Sources Aptiennes du Djebel Aïssa :

C'est un ensemble de sources qui émergent sur le versant Sud du Djebel Aïssa. Les couches Aptiennes plongent vers le Sud avec un pendage de 45°. Ces sources à faible débit (0.3 à 0.5 l/s) appartiennent au niveau inférieur de l'Aptien.

Les sources de Djebel Aïssa sont localisées entre les niveaux argileux du Continental Intercalaire et les grés siliceux du jurassique supérieur.

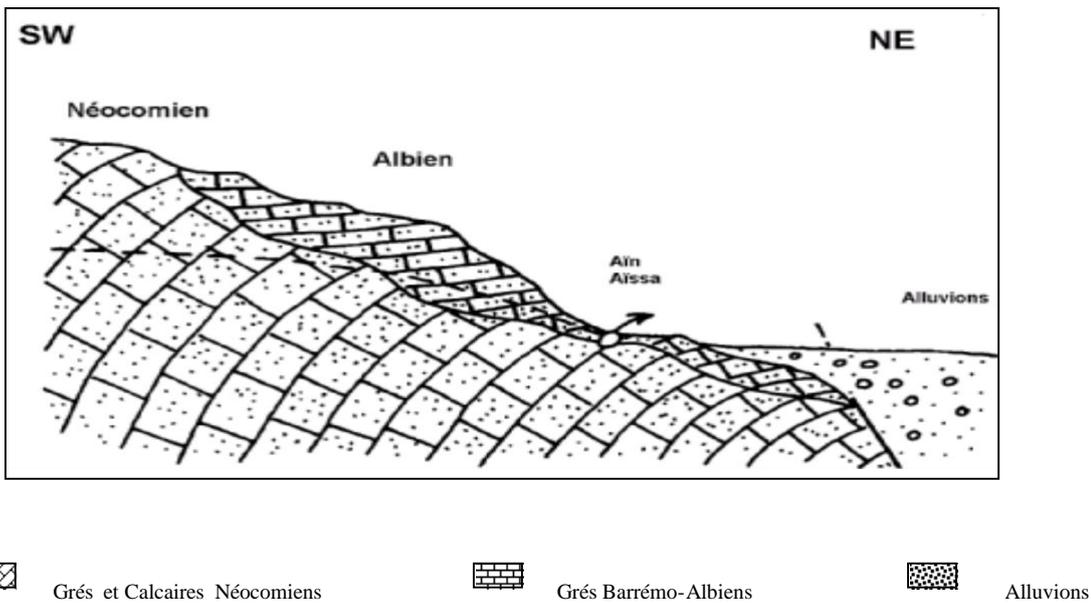


Figure 18 : Coupe schématique montrant les conditions d'émergence d'Ain Aïssa (MANSOUR 2007)

6.3 - Sources de Tiout :

Les sources de Tiout affleurent dans le lit de l'oued Tiourtelt, à environ 1.5 km du village de Tiout. Leur débit dépasse 15 l/s (2007). L'eau émerge par plusieurs griffons répartis en 02 niveaux et séparés par une dalle de grés compacte de 12 mètres d'épaisseur. Les deux groupes d'émergence sont distants de 300 mètres. Les grés Albiens à cet endroit ont un pendage de 10° vers le Nord Ouest et forment un des exutoires du synclinal de Maader. (Mansour 2007)

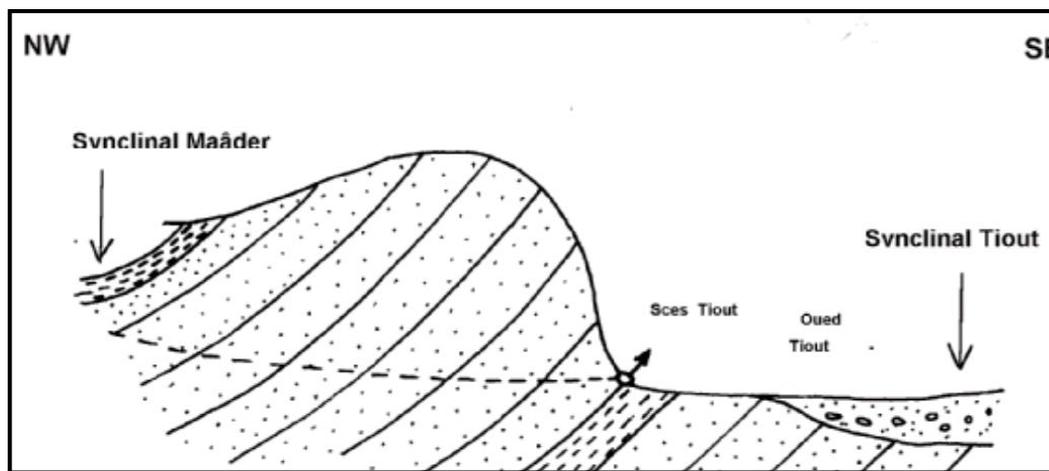


Figure 19 : Coupe schématique montrant les conditions d'émergence des sources de Tiout

6.4 - Ain Tiourtelt :

Située à 11 km de la localité de Tiout, la source affleure dans le lit de l'oued Tiourtelt avec un débit de 10 l/s (2007), alimenté par les grès fissurés de l'Albien. Par sa position stratigraphique, la source occupe un niveau plus élevé que les sources de Tiout. Ce niveau qui n'est pas représenté dans le synclinal de Ain Séfra mais dans son prolongement vers le Nord Est est contenu dans les grès grossiers très fissurés marquant le sommet de l'étage. Tout autour de la source, les dépôts quaternaires masquent complètement les affleurements gréseux.

7- HYDRODYNAMIQUE:

La carte piézométrique de Ain sefra établie en 2010 par (RAHMANI) montre :

Dans la partie Nord du secteur : un sens de l'écoulement:

NordEst – SudOuest dans la dépression de Tirkount.

SudOuest – NordEst dans la région de Garet Kheil.

Les lignes de courant montrent que les eaux drainées proviennent des flancs :

Sud de Djebel Hirech et Nord de Djebel Aissa.

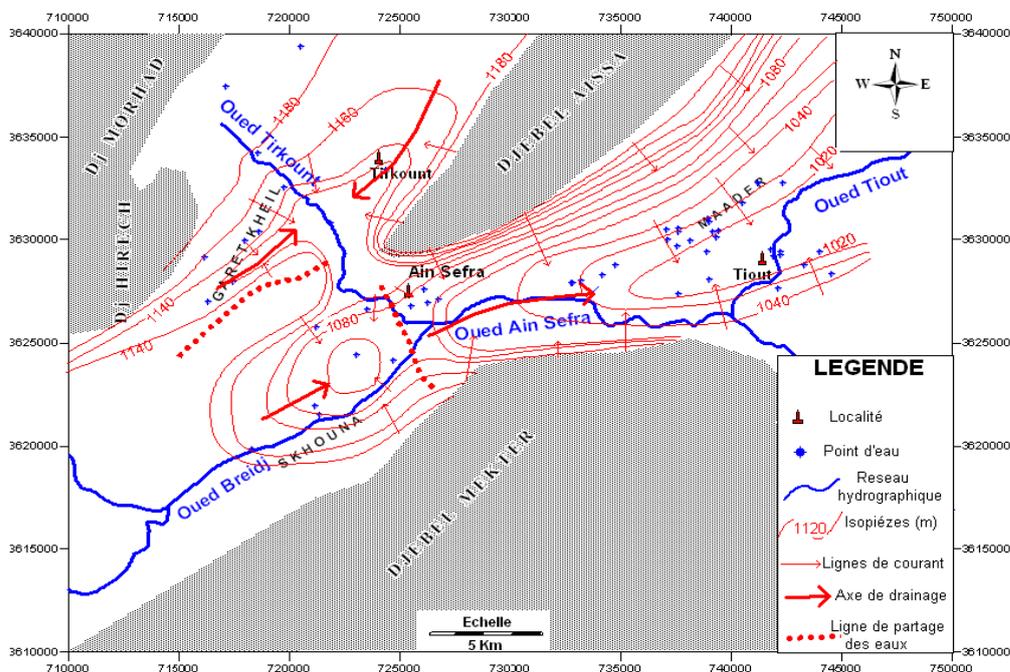


Figure 20 : Carte piézométrique (Septembre 2010, Rahmani)

A ces niveaux les isopiezes sont espacées au niveau du centre des bassins, avec un gradient hydraulique de 10 à 20 ‰ pour se rétrécir, avec un gradient hydraulique de l'ordre de 25 à 35 ‰.

Cette variation du gradient peut être expliquée par des variations latérales des perméabilités.

Notons que dans cette zone l'Oued Tirkount draine la nappe.

Une ligne de partage des eaux séparant les synclinaux de Garet Kheil et Skhouna.

Dans la partie Sud:

L'écoulement souterrain global se fait de l'Est vers l'Ouest, avec une dépression piézométrique au niveau de Skhouna qui correspond à une zone de captage. Les eaux sont drainées par les Oued Breidj – Ain Sefra et Tiout et la nappe est alimentée par le Djebel Aissa au Nord et par Djebel Mekter au Sud.

Le gradient hydraulique varie en général de 10‰, au centre des bassins, à 35 ‰ au niveau des piedmonts de la partie Sud de Djebel Aissa.

7.1- Interprétation de la carte piézométrique :

La nappe Barrémo _Albo- Aptien est représentée par des eaux circulant dans des terrains hétérogènes gréseux, argileux plissés et affectés par une fissuration.

La carte piézométrique (janvier 2010) du secteur étudié (figure 21), montre que le sens général de l'écoulement de la nappe de Maader est suivant une direction N-S.

Les lignes de courant montrent que les eaux drainées proviennent du Nord à partir du Djebel Aïssa et de l'Est et se dirigent vers l'exutoire principal de la nappe : la source de Tiout

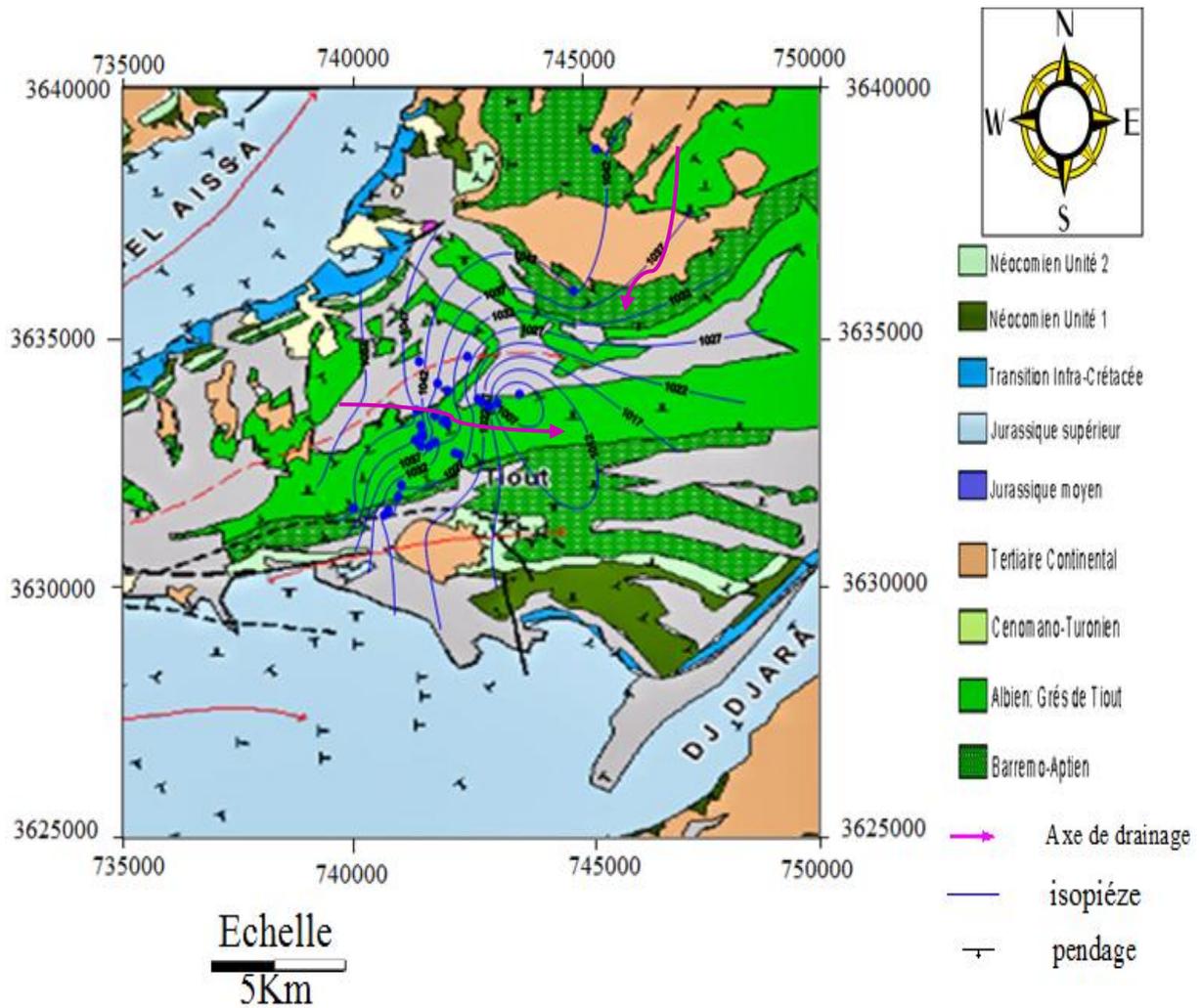


Figure 21 : Carte hydrogéologique de la nappe d’El Maader (Janvier 2010)

8 - Les essais de puits et pompage d’essai :

Les essais de puits par palier de débit, suivis d’arrêts de durées égales et courtes évaluent les caractéristique du complexe aquifère \ ouvrage de captage. Ce sont le débit spécifique, les pertes de charge et la productivité.

Les pompages d’essais, de longue durée, mesurent la transmissivité et le coefficient d’emmagasinement et étudient qualitativement les caractéristiques particulière de l’aquifère comme les conditions aux limites les hétérogénéités et la drainance.

HYDROGEOLOGIE

8.1 Les essais de pompage par paliers: Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 09 : Essai de pompage par palier dans le forage Maader1

N° palier	Débit (m ³ /h)	N. dynamique (m)	Niveau de Rabattement (m)	Durée de pompage (h)
1 ^{er}	43,2	55,90	27,80	5
2 ^{ème}	54	67,40	39,30	5
3 ^{ème}	64,8	70,28	42,18	5
4 ^{ème}	72	80,90	52,80	5

8.1.1 Courbe caractéristique :

La forme de la courbe caractéristique représentant la fonction $S=f(Q)$ apporte des informations sur le comportement hydrodynamique du complexe aquifère. Elle détermine le niveau maximum d'exploitation qui est de 72 m³/h (20l/s) pour un rabattement maximum.

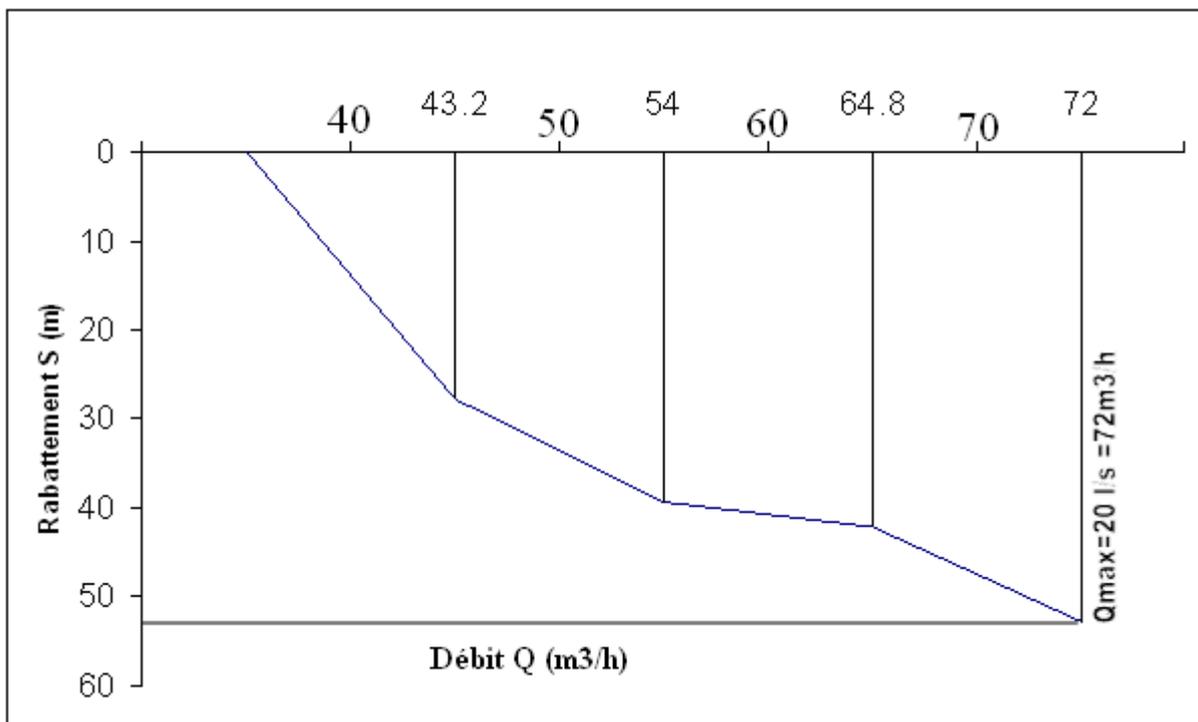


Figure 22: Courbe caractéristique $S = f(Q)$.

8.1.2 Calcul de débit spécifique :

Le débit spécifique (q_s) est le débit pompé Q rapporté au rabattement S dans le forage. Les résultats des essais globaux et le calcul des débits spécifiques pour chaque palier sont représentés dans le tableau 09

Tableau 10 : calcul du débit spécifique

N ° palier	Débit pompé (m ³ /h)	Rabattement (m)	Débits spécifiques (m ³ /h/m)
1 ^{er}	43,2	27,80	1,55
2 ^{ème}	54	39,30	1,37
3 ^{ème}	64,8	42,18	1,54
4 ^{ème}	72	52,80	1,36

8.2 Les essais de pompage dans les forages Maader:

L'essai de pompage a été effectué avec quatre paliers à débit enchaînés pour fixer le débit d'exploitation. Une fois le débit d'exploitation est connu, un essai de longue durée (72h) a été exécuté avec des débits différents (tableau annexe).

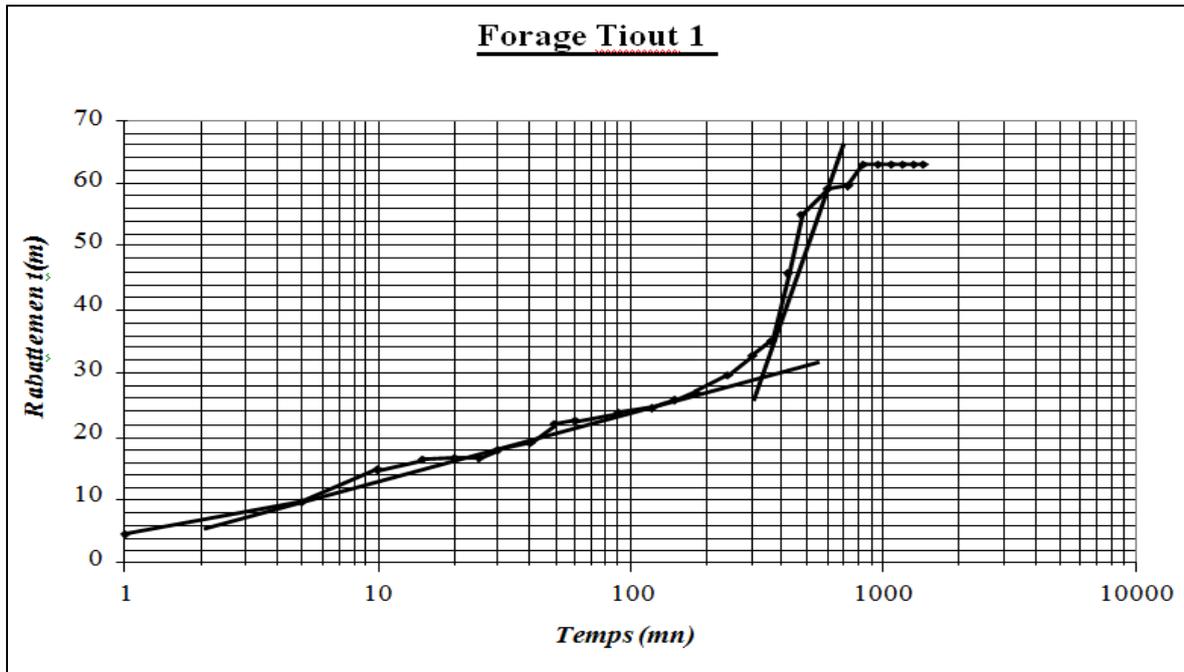


Figure 23: courbe de descente (Tiout 1)

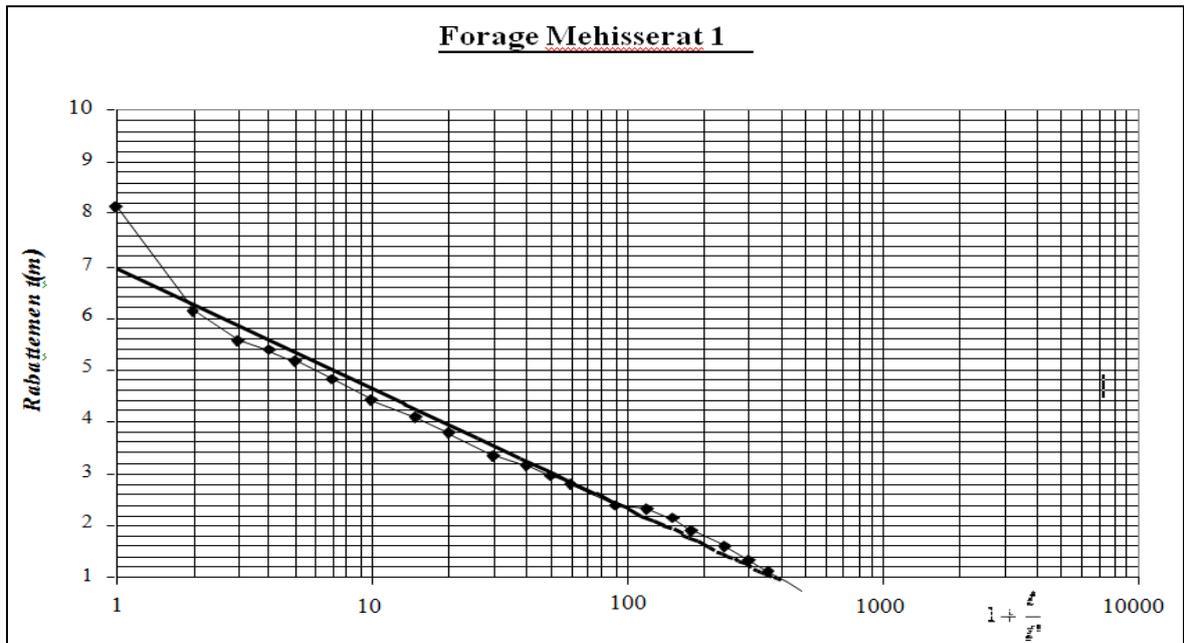


Figure 24: courbe de remonte (Mehisserat 1)

HYDROGEOLOGIE

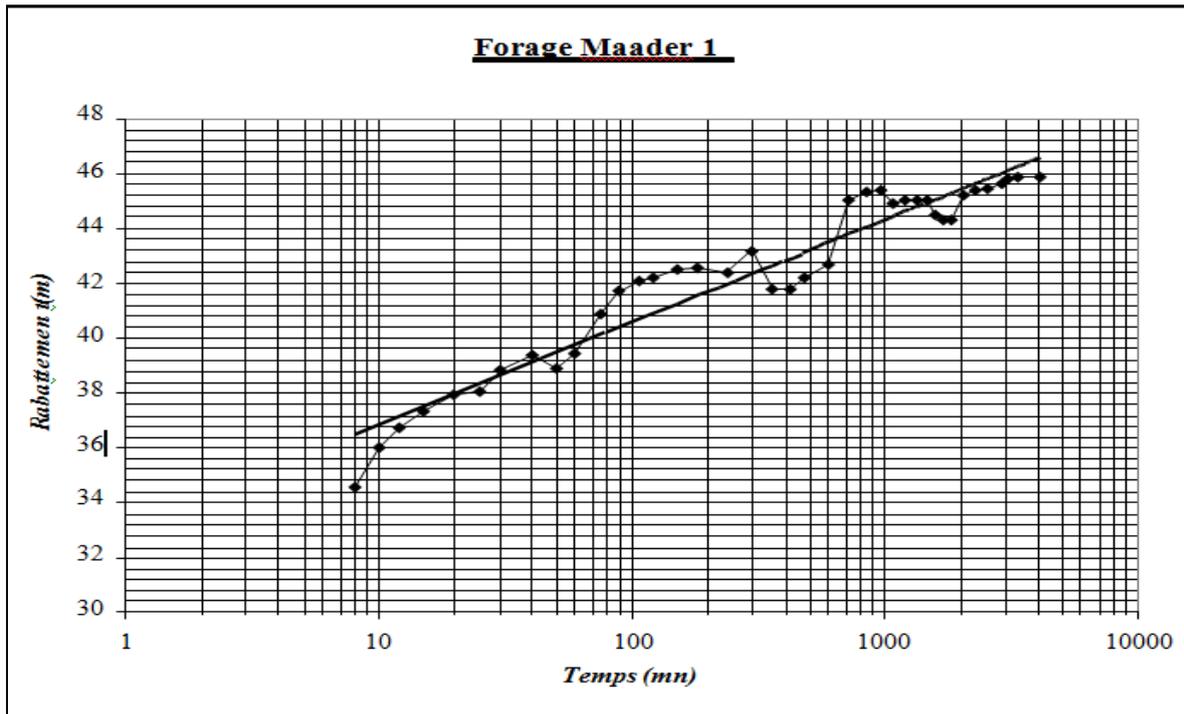


Figure 25: Courbe de descente (Maader 1)

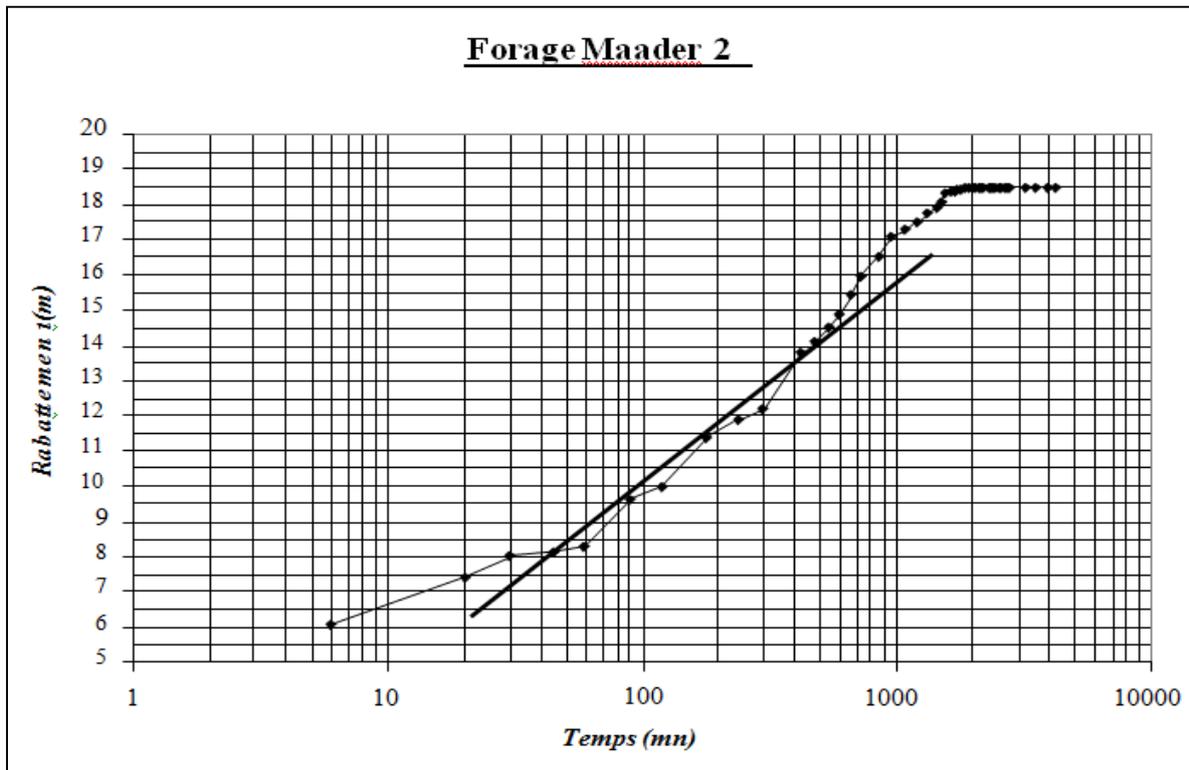


Figure 26: Courbe de descente (Maader 2)

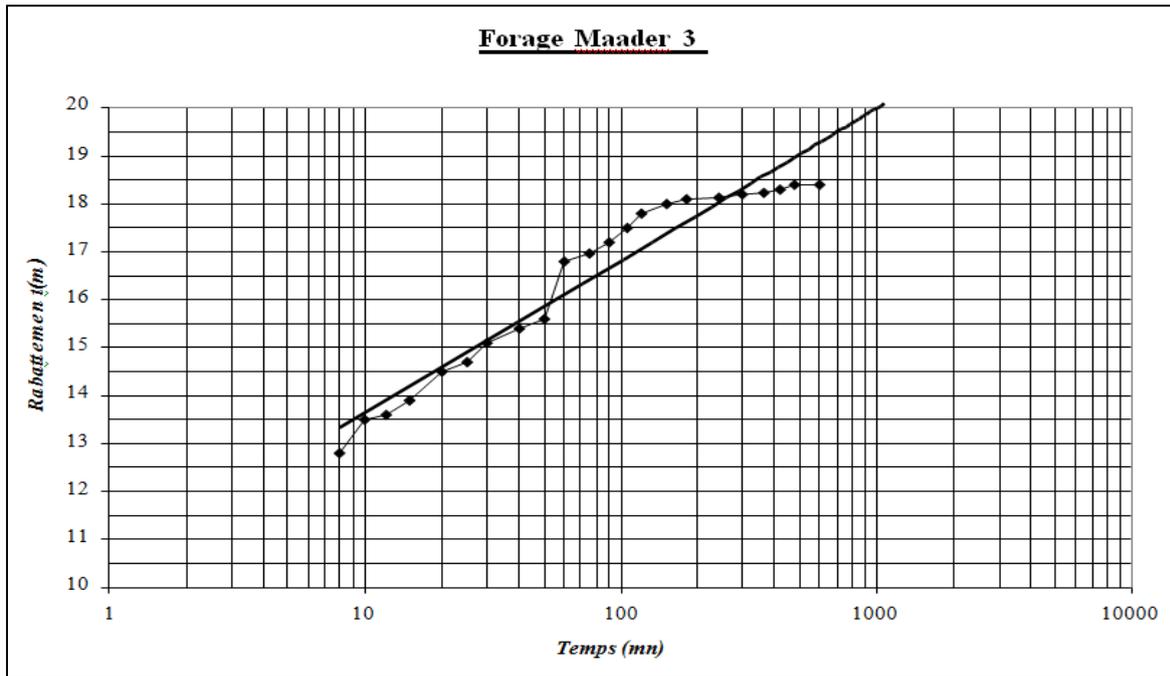


Figure 27: Courbe de descente (Maader 3)

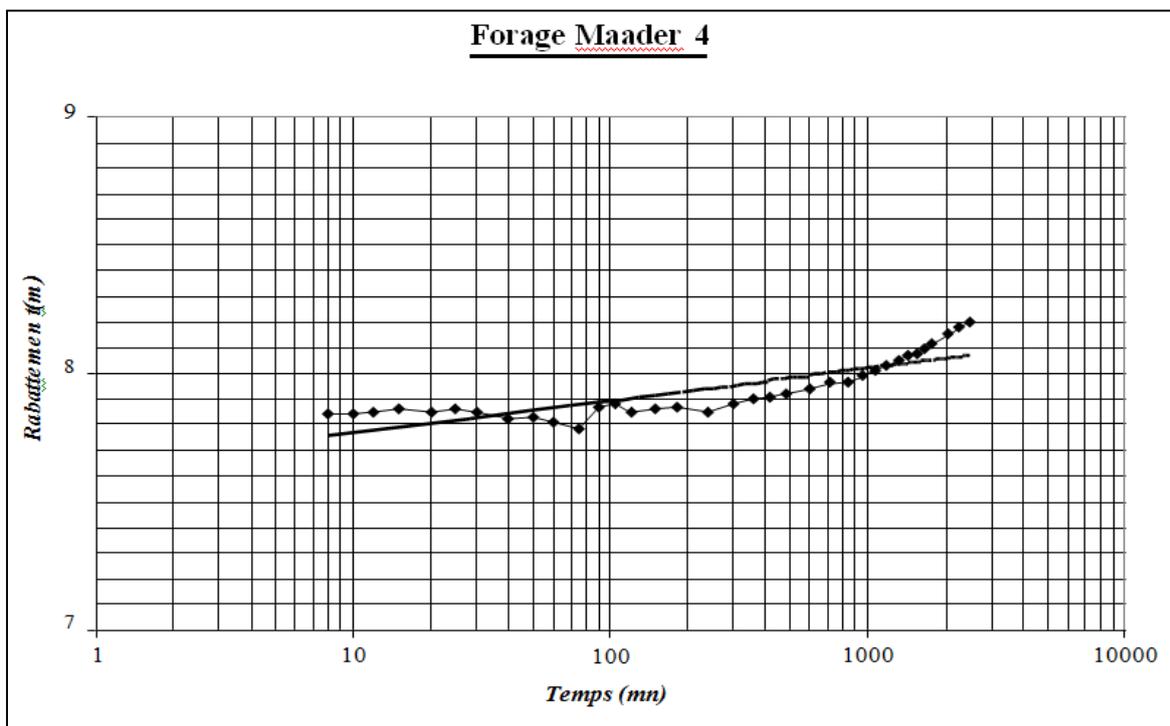


Figure 28: Courbe de descente (Maader 4)

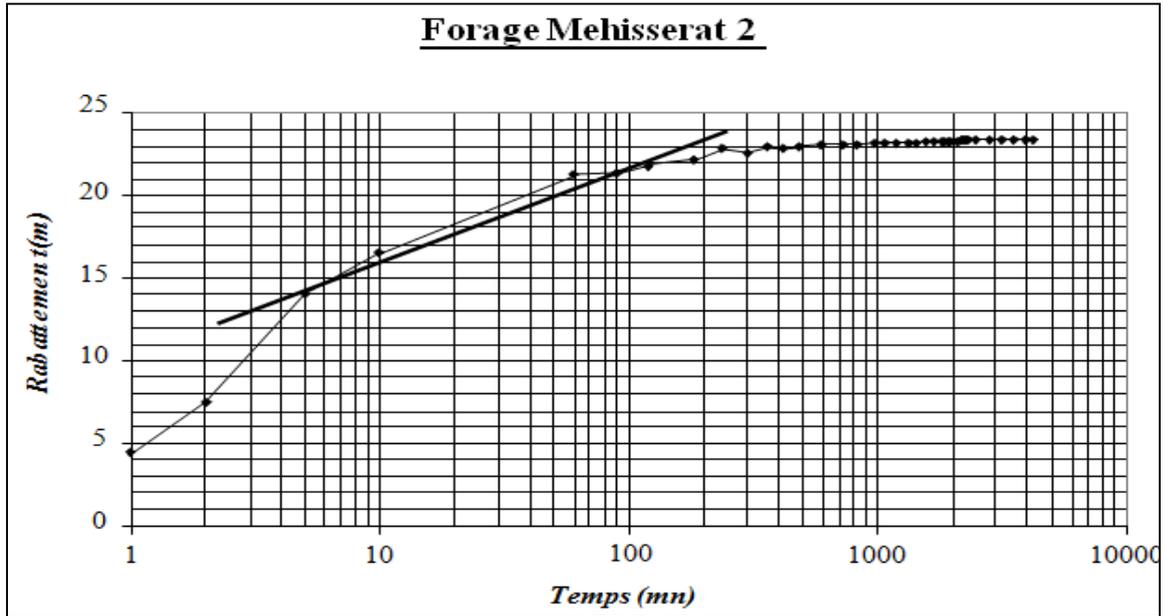


Figure 29 : Courbe de descente (Mehiserat 2)

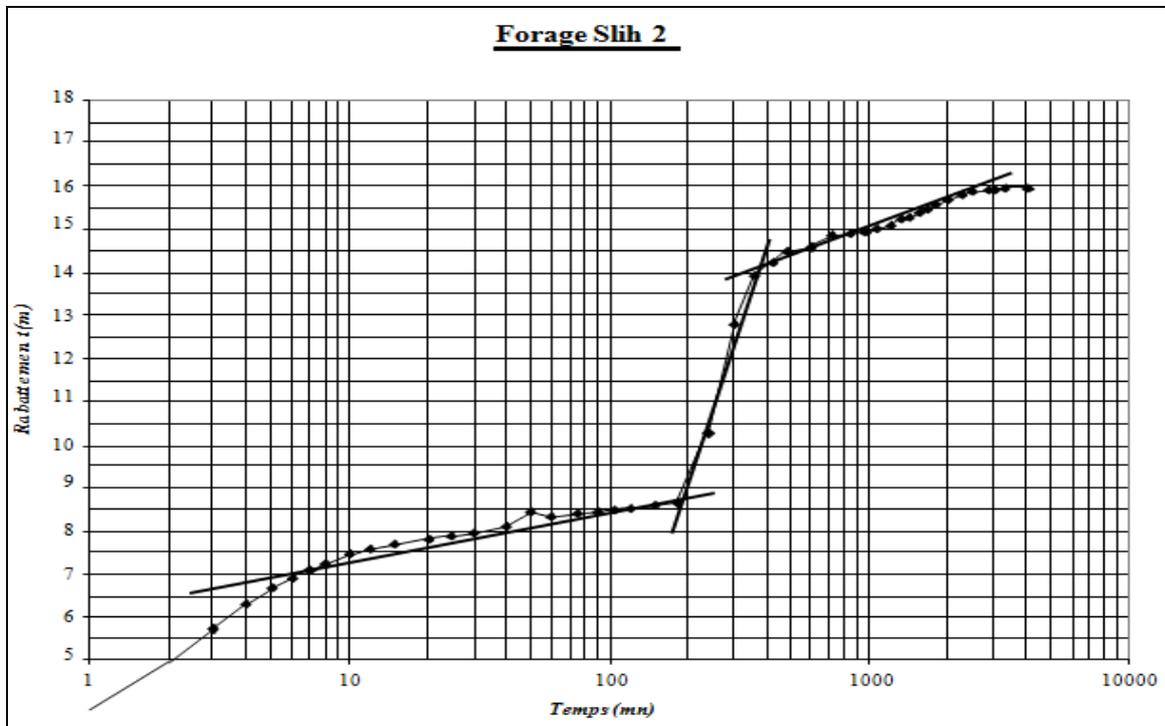


Figure 30: Courbe de descente (Slih 2)

9. La transmissivité:

Des essais de pompage de longue durée (48 h à 72 h) à débit constant ont été effectués sur les différents forages.

La transmissivité est calculée par la pente de la droite représentative. Elle est calculée par l'expression de JACOB:

$$T = 0.183 \frac{Q}{C}$$

Avec : Q : débit de pompage (m³/s)

T : la transmissivité exprimée en (m²/s)

C : la pente de la droite (m)

10. Le coefficient d'emmagasinement :

Le coefficient d'emmagasinement est calculé par l'équation:

$$S = 2.25 \frac{Tt_0}{x^2}$$

T: Transmissivité en m²/s

t₀: temps écoulé à un instant donné depuis le début de pompage

en seconde x: distance du piézomètre à l'axe du puits en m

Tableau 11: les valeurs des transmissivité et Le coefficient d'emmagasinement

N	FORAGE	X(m)	Y(m)	&h(m)	Q (l\s)	T(m ² s)	S
1	MAADER1	737577.55	3629575.35	3.8	18	9.3* 10 ⁻²	5.3* 10 ⁻¹
2	MAADER2	738947.00	3630908.00	5.6	18	5.8* 10 ⁻⁴	6.6* 10 ⁻¹
3	MAADER3	738930.75	3629298.60	2.7	15	2* 10 ⁻³	1.58* 10 ⁻¹
4	MAADER4	742359.83	3632662.20	0.15	40	2.3* 10 ⁻²	1.8* 10 ⁻²
5	TIOUT1	744600.00	3629600.00	8	1	2.3* 10 ⁻⁵	2.6* 10 ⁻³
6	MEHISSERAT1	732850.00	3627800.00	2.4	13	1* 10 ⁻³	6.8* 10 ⁻³
7	SLIH 2	734200.00	3628200.00	1.25	13	1.9* 10 ⁻³	3.22* 10 ⁻¹
8	MEHISSERAT2	732800.00	3627800.00	4	13	6 * 10 ⁻⁴	1.01 * 10 ⁻¹

Conclusion :

L'étude piézométrique de l'aquifère du synclinal Barrémo-Albo-Aptien d'El Maader montre un écoulement N-S.

Les sens de l'écoulement permettent de confirmer que l'exutoire de la nappe pour ce synclinal est la source de Tiout (Ain Messaoud).

L'alimentation de la nappe se fait par infiltration des eaux de pluie et à partir des massifs du Djebel Aissa.

La valeur du gradient hydraulique met en évidence un changement de faciès et une alimentation par les formations Jurassiques du Djebel Aissa .La faible valeur du gradient hydraulique peut s'expliquer par une faible alimentation sur la partie latérale de la nappe.

CHAPITRE IV

Modélisation

1. Introduction :

Pour l'hydrogéologue et le planificateur de ressources hydriques, le modèle mathématique est devenu un outil essentiel grâce à des facteurs tels que les nouvelles performances des ordinateurs, les développements mathématique (statistique et recherche opérationnelle) ainsi que les améliorations quantitatives et qualitatives des données historique. Par ailleurs, le modèle mathématique a vu grandir son importance comme instrument de synthèse, de prévision et de design depuis que les aménagements hydrauliques ponctuels sont devenus régionaux, c'est -à - dire propres à une région géographique. De ce fait, le traitement des données devenait plus complexe à cause du nombre important de facteurs internes ou environnants et des liens souvent subtils entre les divers composants.

2. Etude théorique de la modélisation :

2.1 Définition d'un modèle :

Un modèle est une représentation simplifiée, sous formes physique ou mathématique, d'un système complexe dans lequel les réponses produites par des sollicitations externes sont difficilement prévisible à cause du très grand nombre de facteurs en jeu. Sous leur forme physique, les relations entre le modèle et réalité représentée sont du type figuratif (modèles réduits, photographies, croquis, etc...) ou symbolique (carte géographique, etc.) tandis que sous sa forme mathématique, le système est représenté par une expression analytique.

D'après Karplus (1983) Un modèle mathématique est ensemble d'équations caractérisant un système réel, appelé prototype, de telle sorte qu'an moins un nombre de liens entre des sollicitations externes et des réponses correspondants correspondantes soient représentés de façon adéquate.

2.2 Méthode de modélisation :

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. Il devient alors possible de résoudre les équations d'écoulement en chaque point du domaine modélisé et sur la période de simulation. La discrétisation spatiale consiste à définir des zones élémentaires où les propriétés hydrauliques des terrains sont homogènes : ce sont les mailles du modèle.

La discrétisation temporelle consiste à définir les conditions hydrauliques aux limites du modèle sur l'ensemble de la période de simulation.

MODELISATION

Il existe deux solutions pour résoudre les équations d'écoulement et de transport en milieu souterrain (MARSILLY. 1994)

2.2.1 Les différences finies :

Cette méthode est facile à programmer et convient à la résolution de problèmes régionaux d'écoulement des nappes. En pratique elle se limite à des mailles simples et représente les hétérogénéités du milieu dans directions parallèles aux cotés des mailles.

2.2.2 Les éléments finis :

C'est une méthode difficile à programmer et à utiliser et qui demande d'avantage 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 hétérogénéités du milieu. Elle est efficace dans les problèmes locaux de génie civil.

2.3 Méthodes de résolution :

Si l'on considère une maille i , elle est entourée de quatre mailles que l'on peut nommer : N (nord), S (sud), E (est) et W (ouest).

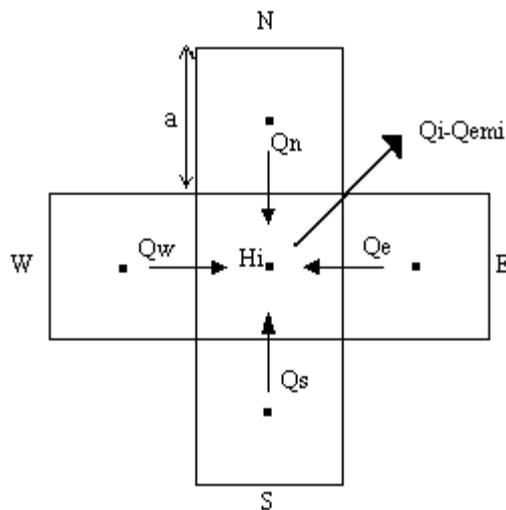


Figure 31 : Bilan des flux en eau sur une maille i

D'après le principe de continuité qui implique conservation de débit entrant algébriquement par les quatre limites de la maille i , nous avons :

$$Q_N + Q_S + Q_E + Q_W = Q_i + Q_{emi} \text{ où}$$

Q_{emi} désigne le débit emmagasiné dans la maille i .

La loi de Darcy appliquée à la maille i nous donne :

$$Q_N = TN \cdot a \cdot (H_N - H_i) / a = TN \cdot (H_N - H_i) \text{ où}$$

TN représente la transmissivité de l'aquifère entre la maille i et la maille située au nord.

MODELISATION

H_i et H_N sont les approximations de charge hydraulique respectivement au centre de la maille i et de la maille N .

Enfin, l'équation d'état fournit l'expression du débit emmagasiné :

$$Q_{emi} = a^2 \cdot S_i \cdot dh/dt$$

S_i est le coefficient d'emmagasinement défini au centre de la maille i .

Tous les calculs précédents nous permettent d'obtenir :

$$T_N \cdot (H_N - H_i) + T_S \cdot (H_S - H_i) + T_E \cdot (H_E - H_i) + T_w \cdot (H_w - H_i) = Q_i + a^2 \cdot S_i \cdot dH_i / dt$$

En appliquant le même travail à chaque maille du modèle, nous obtenons un système linéaire de n équations à n inconnues que nous pouvons résoudre.

Nous simplifierons la présentation en adoptant l'écriture matricielle suivante :

$$T \cdot H = Q + a^2 \cdot S \cdot dH / dt$$

En définissant les vecteurs :

$$\begin{array}{ccc} H_1 & & Q_1 \\ \text{Piézométrie } H \begin{array}{l} H_2 \\ H_3 \end{array} & \text{et les débits} & Q = \begin{array}{l} Q_2 \\ Q_3 \end{array} \end{array}$$

Et les matrices T et S et construites respectivement à partir des la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement.

3. Traitement des systèmes aquifères multicouches :

La méthode de traitement numérique de l'équation de diffusivité qui vient d'être exposée peut être sans difficulté adaptée au cas des systèmes aquifères multicouches.

Chaque couche figurant un aquifère individualisé est maillée à l'aide de mailles carrées de côté a , de telle sorte que les différentes mailles, lorsqu'elles existent, se correspondent en projection verticale (figure 32).

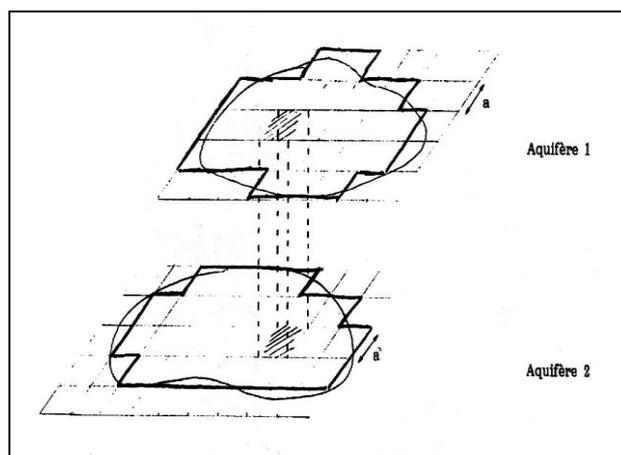


Figure 32: discrétisation spatiale d'un domaine bicouche

Le bilan des flux pour chacune des mailles s'établit alors comme suit, en prenant l'exemple d'une maille i quelconque (figure 33). Le principe de continuité permet d'écrire:

$$Q_N + Q_E + Q_S + Q_W + Q_H + Q_B = Q_i + Q_{emi}$$

Où Q_N , Q_E , Q_S et Q_W représentent les échanges d'eau entre la maille i et ses voisines situées dans les directions N, E, S et W dans la même couche :

- Q_i est le débit total algébrique prélevé dans la maille i ,
- Q_{emi} est le débit emmagasiné,
- Q_H et Q_B figurent les débits échangés respectivement avec l'aquifère supérieur et l'aquifère inférieur à travers les semi-perméables, ou débits de drainance.

Aux débits de drainance près, les termes du bilan sont identiques au cas monocouche, et seront donc évalués de la même manière.

Ce système possède la même forme mathématique que le système correspondant au cas monocouche, la matrice des transmissivités T étant simplement complétée par les termes T_H et T_B sans que ses propriétés en soient changées.

Tous les développements déjà faits concernant l'introduction des conditions aux limites, la recherche des solutions en régime permanent et en régime transitoire s'appliquent donc encore.

Quelques remarques s'imposent cependant sur la mise en oeuvre des méthodes numériques, dues à l'existence des termes de drainance:

MODELISATION

- il convient de prendre garde à l'ordre de grandeur des coefficients de transfert verticaux TH et TB par rapport aux transmissivités de passage.

En effet, dans leur définition interviennent non seulement les caractéristiques des semi-perméables, mais aussi la surface de la maille. Il importe donc de définir un maillage adapté, sachant que les mailles devront être d'autant plus petites que le rapport perméabilité/ épaisseur du semi-perméable sera plus grand.

- la présence des termes supplémentaires TH et TB dans la matrice T majore la largeur des bandes dans des proportions notables; il s'ensuit une augmentation de l'encombrement mémoire et du temps de calcul qui pénalise la méthode de résolution directe de Gauss-Jordan par rapport à la méthode itérative de Gauss-Seidel.

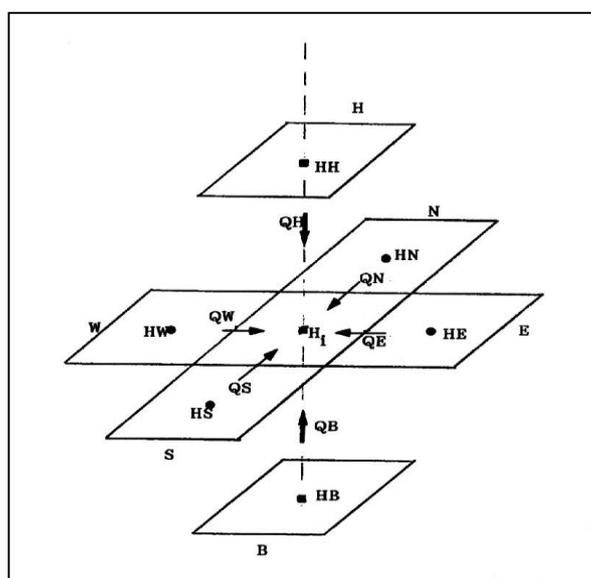


Figure 33 : bilan des flux en eau sur la maille i dans le cas multicouche

4. Quelques perfectionnements utiles de la méthode des différences finies

4.1 Amélioration de la discrétisation spatiale :

La discrétisation de l'espace en mailles carrées régulières présente une grande facilité d'emploi aussi bien en ce qui concerne la mise en œuvre des modèles que la programmation des algorithmes. Cette technique devient cependant pénalisante par suite de l'augmentation du nombre de mailles lorsqu'il s'avère nécessaire de recourir à un découpage fin. Nous proposons ici deux méthodes permettant de ne raffiner le maillage qu'en certains secteurs localisés du modèle.

4.1 Maillage de type "écossais": Cette méthode utilise des éléments rectangulaires disposés de manière analogue aux rayures d'un tissu écossais. La génération du maillage demeure ainsi presque aussi simple qu'avec les éléments carrés.

L'inconvénient principal réside dans le fait qu'un resserrement local des lignes ou des colonnes se répercute jusqu'aux limites du domaine, entraînant le risque de constitution d'éléments trop allongés préjudiciables à un bon déroulement des méthodes numériques (figure 34).

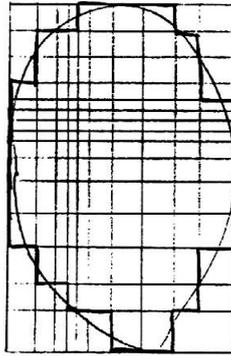


Figure 34: discrétisation spatiale en mailles rectangulaires (type "ecossais")

4.2 Maillage de type "gigogne":

On engendre ce type de maillage en partant de mailles carrées régulières que l'on découpe localement en 4 parties égales. Le processus peut être répété un nombre théoriquement illimité de fois et le raffinement du maillage reste ainsi limité à la stricte étendue nécessaire. Le procédé reste également valable d'un aquifère à l'autre pour les systèmes multicouches (figure 35).

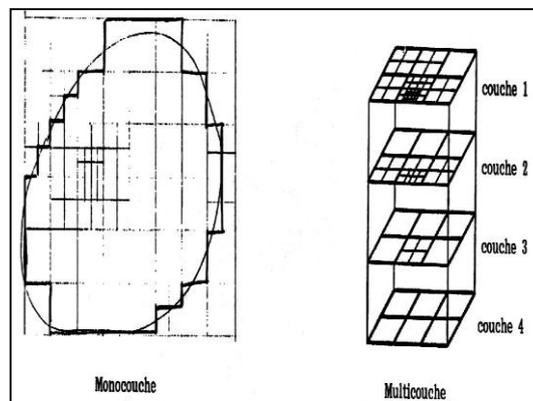


Figure 35: maillage irrégulier, type "gigogne"

5. Conditions aux limites :

Nous définissons des conditions aux limites (conditions de flux ou de potentiel) en des points qui sont supposés être indépendants des phénomènes internes du domaine qui les entoure.

Les principaux types de conditions aux limites couramment citées par (MARSILY, 1981) sont les suivants :

- Limites à potentiel imposé
- limite à flux imposé
- condition de surface libre.

5.1 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 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.

5.2 Limite à flux imposé

Une limite est dite à flux imposé, si le long de cette limite le débit par unité de surface :

$$q_n = -K \cdot \frac{dh}{dn} \text{ est constant et connu.}$$

Cela revient à imposer un gradient de charge perpendiculaire à la limite considérée.

Deux cas se présentent :

- **$dh/dn = 0$: limite à flux nul** : ces limites sont représentées lorsqu'un aquifère est en contact avec des formations imperméables

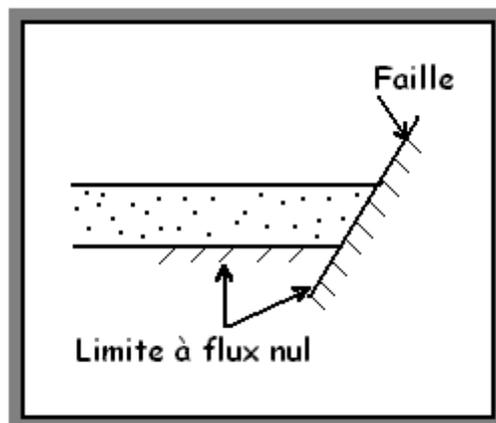


Figure 36: limite à flux nul (MARSILY, 1981)

- $dh / dn \neq 0$: limite à flux imposé non nul : ces limites sont matérialisées par les limites du domaine ou par les ouvrages de captage.

5.3 Condition de surface libre :

La condition de surface libre est une double condition imposée sur une surface :

- condition de potentiel : La pression atmosphérique s'exerce sur tous les points M de la surface libre considérée. Exprimée en charge, elle est prise par convention égale à 0 : $h = z$

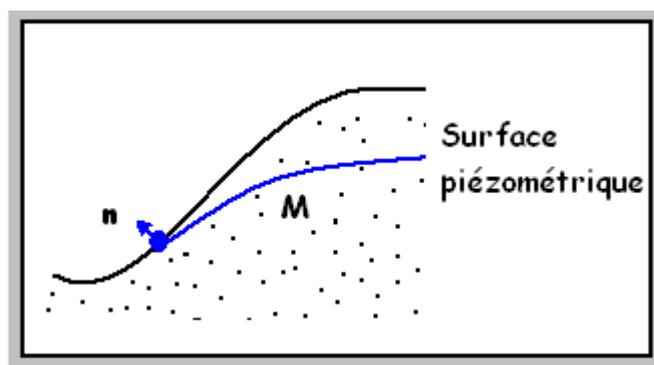


Figure 37: Condition de surface libre (MARSILY, 1981)

6. Calage :

Certains paramètres, impossibles à mesurer à l'échelle du modèle ou à évaluer, font l'objet d'une estimation par calage. Il s'agit de rechercher la valeur optimale de ces paramètres en fonction de critères choisis.

Le choix de la période de référence est capital. On préférera, dans la mesure du possible, des périodes très contrastées qui permettront de juger de la pertinence des paramètres calés en fonction de la représentation par le modèle d'événements très différents.

La qualité de la simulation sur cette période est généralement évaluée en mesurant les écarts entre les séries simulées et observées, l'ajustement des paramètres consistant à rechercher l'écart minimum. Les méthodes de calage peuvent être : manuelles (de type "essai-erreurs"), automatiques (algorithme itératif d'optimisation des paramètres en fonction d'un critère) ou stochastiques.

7. Validation :

La qualité d'un modèle se mesure par les résultats de sa validation. Celle-ci consiste à comparer la réponse théorique, obtenue par le passage d'une sollicitation expérimentale à travers du système, avec cette même réponse, obtenue par des observations directes. Il faut souligner que les valeurs des sollicitations et des réponses utilisées pour la validation doivent être différentes de celles qui sont utilisées pour la calibration du modèle. La validation peut se faire soit de façon purement intuitive (comme la comparaison visuelle des résultats faite à

l'aide de graphiques ou de tableaux), soit de façon analytique (comme la comparaison statique des résultats faite avec des tests appropriés ou au moyen de critères expérimentaux).

8. Application de modélisation à la nappe Barrémo -Albo- Aptien de Maader :

8.1 Outil :

ASMWIN (simulation d'aquifère pour Windows), est un modèle numérique sophistiqué, basé sur la méthode des différences finies. Il permet la résolution de l'écoulement et du transfert de masse, en 2D et en 3D, en régime permanent et en régime transitoire, d'une version très améliorée d'ASM 6.0 qui tourne sous MS-DOS (Kinzelbach & Rausch, 1995).

L'interface graphique permet de créer et de simuler facilement des modèles. Elle peut manipuler des modèles comportant jusqu'à 150 par 150 mailles et 1000 périodes de temps (intervalles de pompage). ASMWIN peut tracer des cartes d'isovaleurs et des tracés colorés des données d'entrée et des résultats de simulation. Des graphiques pouvant être intégrés dans des publications peuvent être sauvegardés sous une large gamme de formats parmi lesquels SURFER, DXF, HPGL et BMP (Windows Bitmap).

Les outils de modélisation comprennent un extracteur de résultats, un interpolateur de champ, un générateur de champ, un estimateur de bilan hydrique et un visualiseur de graphiques.

L'extracteur de résultats permet à l'utilisateur d'extraire les résultats de simulation de n'importe quelle période et de les diriger vers une feuille de calcul. Les résultats peuvent alors être examinés ou sauvegardés dans des fichiers de données ASCII ou compatibles avec SURFER.

L'estimateur de bilan hydrique calcul non seulement le bilan de zones définies par l'utilisateur mais aussi l'échange de flux entre de telles zones. Il permet à l'utilisateur de déterminer le flux à travers une frontière particulière.

8.2 Les paramètres hydrodynamiques :

Les caractéristiques hydrodynamiques des terrains permettent d'évaluer d'une part, leur 'facilité' à laisser l'eau circuler lorsqu'ils sont soumis à un gradient de charge hydraulique, et d'autre part, leur capacité à emmagasiner de l'eau.

Les paramètres qui décrivent ces caractéristiques sont respectivement la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement :

MODELISATION

8.2.1 La transmissivité :

Représente la capacité d'un matériau à laisser circuler l'eau souterraine. Il s'exprime en m²/s et est fonction du coefficient de perméabilité et de l'épaisseur mouillée de l'aquifère.

Nous avons calculé des transmissivités à partir des courbes de descente et de remonte ont été effectué sur les différents forages (tableau 11). Elle est calculée par l'expression de JACOB:

$$T = 0.183 \frac{Q}{C}$$

Avec : Q : débit de pompage (m³/s)

T : la transmissivité exprimée en (m²/s)

C : la pente de la droite (m)

8.2.2 Le coefficient d'emménagement :

Représente la capacité d'un aquifère à libérer l'eau sous l'effet d'un abaissement de la charge hydraulique.

Le coefficient d'emménagement est calculé par l'équation:

$$S = 2.25 \frac{T t_0}{x^2}$$

T: Transmissivité en m²/s

t₀: temps écoulé à un instant donné depuis le début de pompage en seconde x: distance du piézomètre à l'axe du puits en m (tableau 12).

Tableau 12 : les paramètres hydrodynamique des forages

N	FORAGE	X(m)	Y(m)	&h(m)	Q (l/s)	T(m ² /s)	S
1	MAADER1	737577.55	3629575.35	3.8	18	9.3* 10 ⁻²	5.3* 10 ⁻¹
2	MAADER2	738947.00	3630908.00	5.6	18	5.8* 10 ⁻⁴	6.6* 10 ⁻¹
3	MAADER3	738930.75	3629298.60	2.7	15	2* 10 ⁻³	1.58* 10 ⁻¹
4	MAADER4	742359.83	3632662.20	0.15	40	2.3* 10 ⁻²	1.8* 10 ⁻²
5	TIOUT1	744600.00	3629600.00	8	1	2.3* 10 ⁻⁵	2.6* 10 ⁻³
6	MEHISSERAT1	732850.00	3627800.00	2.4	13	1* 10 ⁻³	6.8* 10 ⁻³
7	SLIH 2	734200.00	3628200.00	1.25	13	1.9* 10 ⁻³	3.22* 10 ⁻¹
8	MEHISSERAT2	732800.00	3627800.00	4	13	6 * 10 ⁻⁴	1.01* 10 ⁻¹

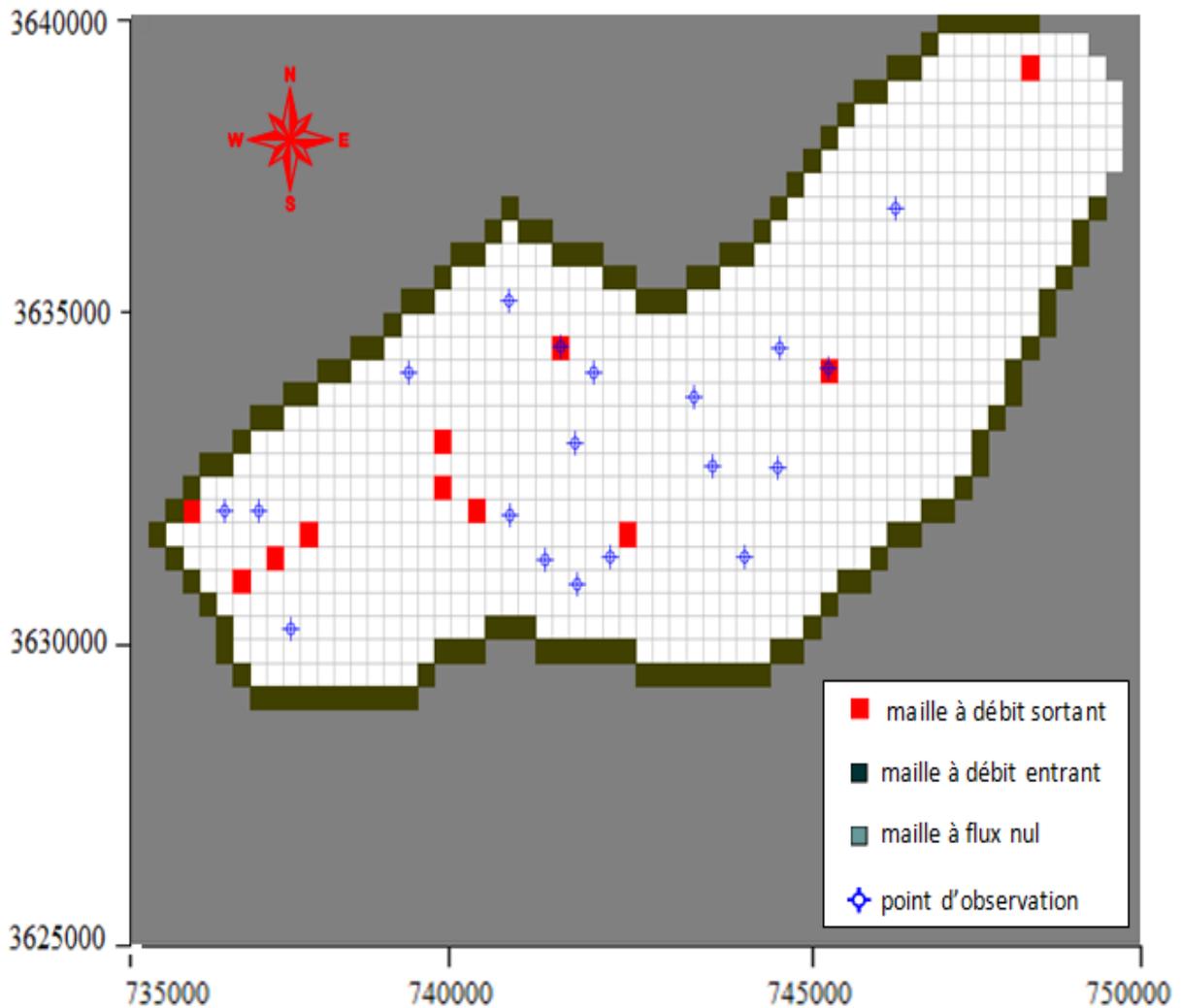


Figure 39 : le maillage et les conditions aux limites du domaine modélisé

11. Calage du modèle:

Le calage du modèle numérique consiste à ajuster les paramètres du modèle afin de reproduire le comportement global du système aquifère.

Pour cela, les résultats issus des simulations sont comparés aux observations disponibles (points de contrôle). La reproduction du comportement global de l'aquifère atteste alors de la qualité du modèle numérique.

11.1 Calage en régime permanent :

11.1.2 Piézométrie :

La piézométrie simulée est présentée à la figure suivante, en comparaison avec la carte piézométrique établie à partir des données d'observation. Le calage vise à reproduire l'allure globale des courbes, les directions d'écoulement et les gradients hydrauliques.

MODELISATION

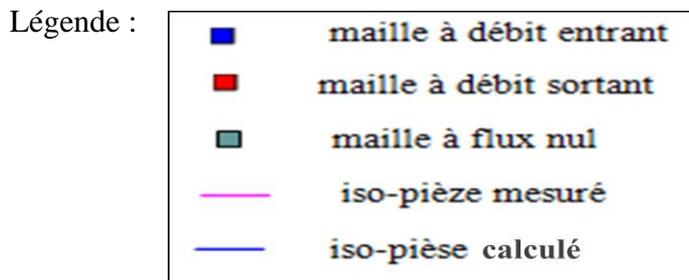
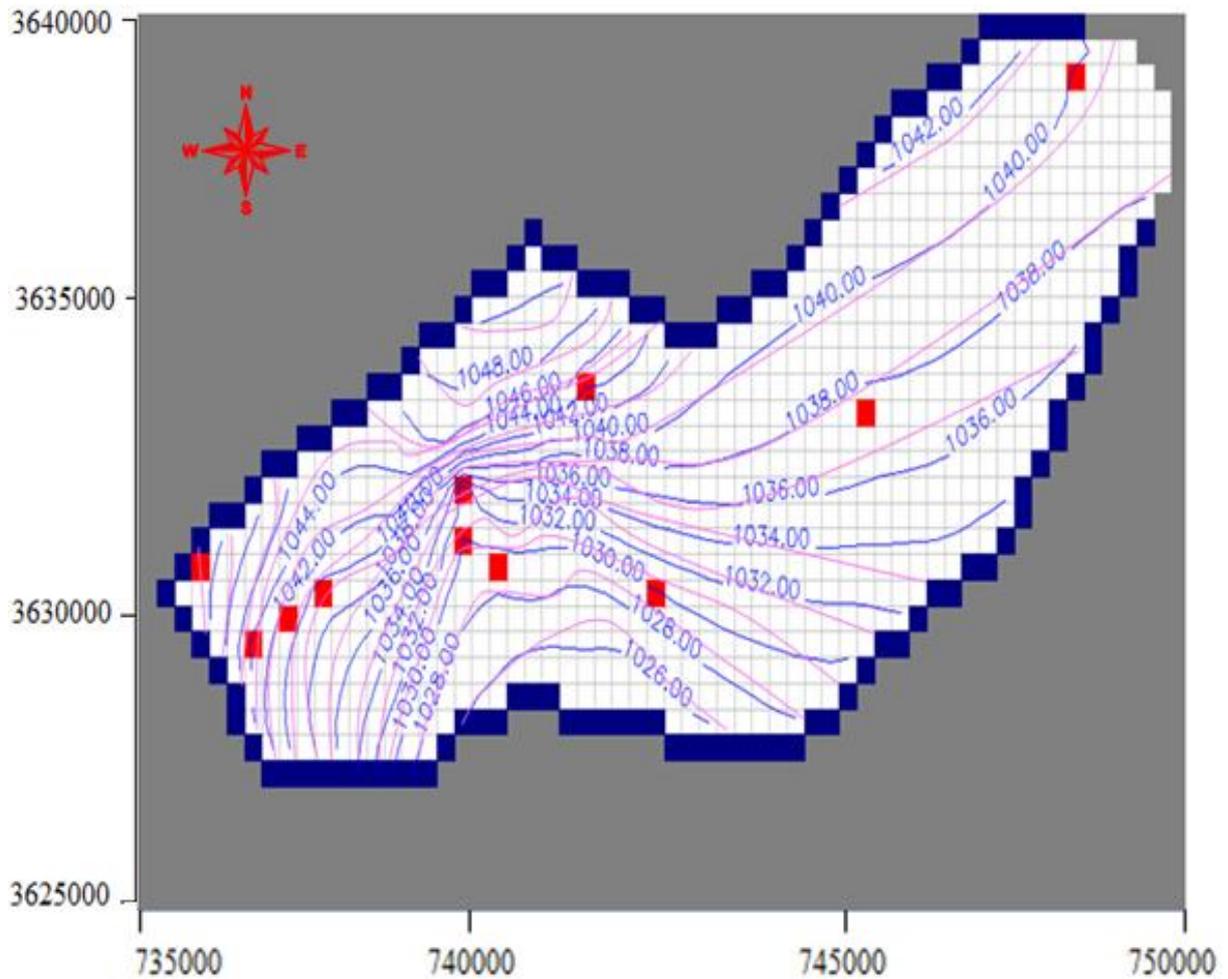


Figure 40 : superposition des courbes des potentiel calculer et mesurés

Les écarts de la piézométrie sont observés au niveau de la droite : H observée $\approx H$ calculée, plus les points de mesure s'approchent vers la droite passant par l'origine plus les écarts diminueront (si les points se superposent à la droite on aura un calage parfait).

MODELISATION

Tableau 13: Ecart entre les potentiels mesurés et calculés après le calage du modèle en régime permanent.

N puits d'observation	Coordonnées (x,y)	H calculé	H mesuré 2010	H mesuré- H calculé
1	(17,16)	1046,7	1047	0,3
2	(23,22)	1029, 8	1032	2,2
3	(27,26)	1025,5	1024	- 1,5
4	(26,15)	1044	1046	2
5	(22,13)	1049,2	1050	0,8
6	(28,16)	1041,5	1040	- 1,5
7	(27,19)	1035,4	1036	0,6
8	(25,24)	1026,8	1028	1,2
9	(29,14)	1043	1042	-1
10	(08,22)	1044,4	1042	-2,4
11	(10,27)	1038,2	1040	1,8
12	(34,17)	1038,4	1037	-1,4
13	(35,20)	1035	1033	-2
14	(37,24)	1031,1	1029	-2,1
15	(39,15)	1038,7	1038	0,3
16	(06,22)	1048	1046	-2
17	(46,09)	1040,2	1040	-0,2
18	(42,17)	1036,2	1035	-1,2
19	(39,21)	1034,2	1032	-2,2

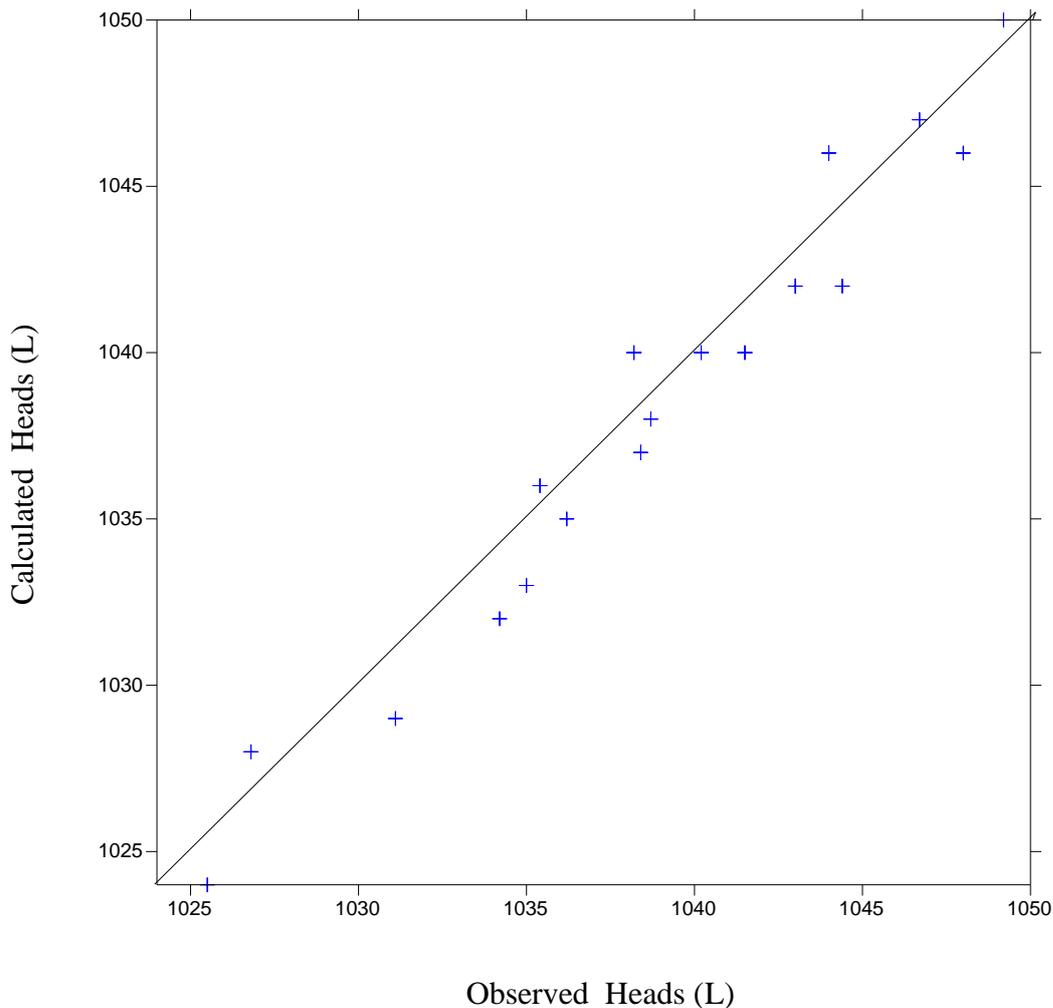


Figure 41 : corrélation entre les potentiels mesurés et calculés en régime permanent par rapport à la droite $x=y$.

11.1.3 Paramètres de calage :

Les perméabilités introduites initialement dans le modèle sont basées sur les valeurs déduites des mesures de terrain (essai de pompage).

Le contour des zones et les valeurs de transmissivité sont ensuite ajustés au cours de la phase de calage.

La carte de répartition des transmissivités obtenues à l'issue de la phase de calage est présentée (figure 42).

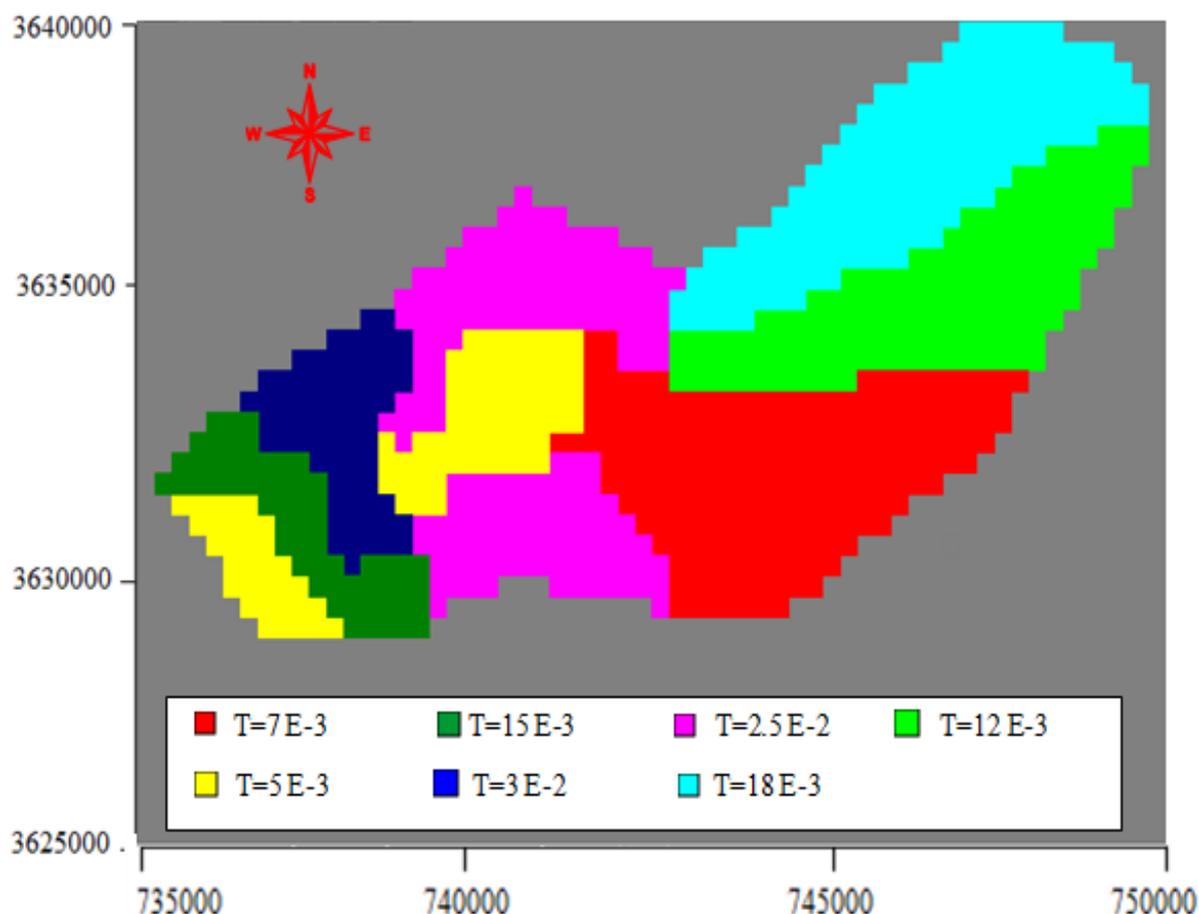


Figure 42: répartition de la transmissivité T (m^2/s) du domaine modélisé

Le calage a été ici réalisé sur la base d'un raisonnement en flux global, il en résulte donc une répartition présentant des zones de transmissivités hétérogènes relativement étendues.

Les faibles valeurs sont rencontrées le long de bordure Sud-Est et le long de la bordure Est de Tiout.

Les valeurs moyennes sont rencontrées dans la partie Ouest vers Ain sefra.

Les plus fortes valeurs de transmissivité sont situées au niveau du cœur de synclinal liées aux affleurements importants des grés qui favorisent l'alimentation de la nappe.

11.1.4 Bilan de la nappe

Un bilan hydraulique a été effectué de façon à mieux cerner le fonctionnement global du système aquifère sous l'impact de l'infiltration ainsi que l'effet de l'exploitation. Le tableau suivant présente le bilan des volumes moyens échangés par la nappe

MODELISATION

Tableau 14 : bilan de la nappe calculé par le modèle

FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
CONSTANT HEAD	1.654281E+00	1.116805E+00	5.374765E-01
WELL	0.000000E+00	2.530000E-01	-2.530000E-01
LEAKAGE	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
BOUNDARY FLOW	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
RECHARGE	5.153371E-03	0.000000E+00	5.153371E-03
SUM	1.922436E+00	1.922437E+00	-7.152557E-07

De façon générale, l'examen de ce tableau montre qu'il y a un équilibre très remarquable entre les entrées et les sorties du système, on constate que l'alimentation se fait par l'infiltration des eaux de pluie.

11.2 Le modèle en régime transitoire :

Le régime transitoire représente une continuité au calage en régime permanent, l'objectif principal de cette étape est de caler le coefficient d'emménagement et d'appréhender l'évolution de la piézométrie suite à des perturbations multiples variables. En ce qui concerne la période adoptée pour ce calage, nous avons simulé le comportement du système pour la période allant de situation initiale de 2007(année de référence) à l'année 2010.

11.2.1 La carte de répartition des coefficients d'emménagement :

La carte de répartition des coefficients d'emménagement retenus à l'issue de la phase de calage du modèle hydrodynamique en régime transitoire est présentée en (Figure 43). Les valeurs de coefficient d'emménagement obtenues sont comprises entre 3.10^{-3} et 2.10^{-1} . Ces variations de coefficient d'emménagement permettent de reproduire des variations piézométriques très hétérogènes spatialement.

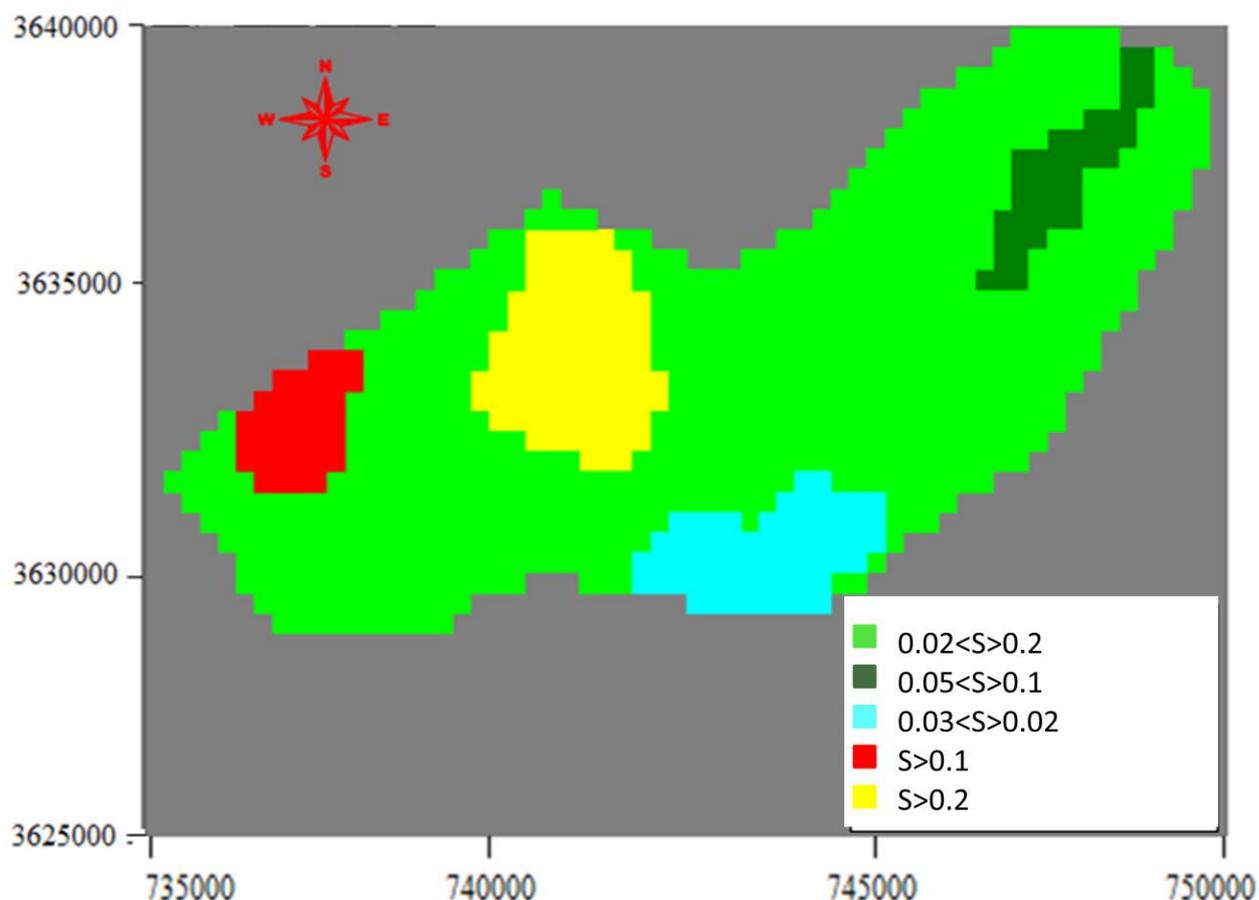


Figure 43: répartition des coefficients d’emmagasinement du domaine modélisé

11.2.2 La carte simulée 2008 :

On induit une perturbation par rapport au régime permanent et on étudie grâce au modèle la vitesse d’établissement d’un nouvel équilibre dynamique, c’est-à-dire le temps nécessaire à l’établissement d’un nouveau régime permanent. Ce type de simulation permet de mesurer, l’inertie ou la réactivité du système hydrogéologique.

Pour les systèmes peu réactifs, les paramètres hydrogéologiques comme la piézométrie, la transmissivité, ne réagissent que très lentement aux aléas climatiques par exemple ou bien à des changements dans le rythme d’exploitation de la nappe. Dans ce cas, après avoir démontré ces propriétés par une modélisation utilisant des pas de temps assez petits, il sera possible d’effectuer des calculs plus simples à partir de paramètres globaux (annuels) du climat par exemple. Cette démarche ne sera pas possible pour des systèmes plus réactifs.

MODELISATION

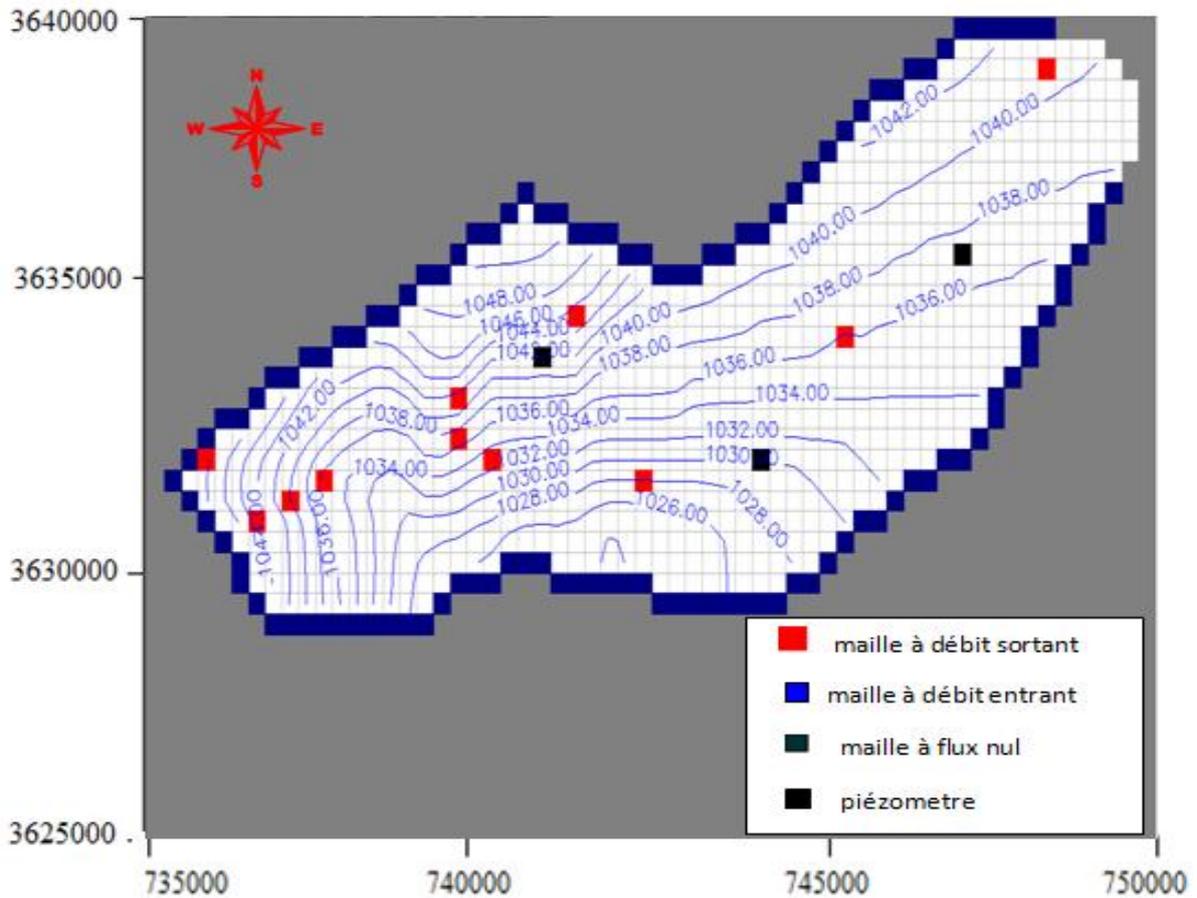


Figure 44: Le carte simulée 2008 de la nappe Barrémo-Albo-Aptienne

Tableau 15: bilan de la nappe calculé par le modèle après une année.

FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
CONSTANT HEAD	1.544152E+00	1.296247E+00	2.479043E-01
WELL	0.000000E+00	2.530000E-01	-2.530000E-01
LEAKAGE	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
BOUNDARY FLOW	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
RECHARGE	5.153371E-03	0.000000E+00	5.153371E-03
SUM	1.549305E+00	1.549303E+00	1.907349E-06

11.2.2 La carte simulée 2009 :

Ce calage a été réalisé en adoptant une démarche itérative, afin d'affiner l'évaluation combinée des différents paramètres hydrogéologiques de notre aquifère.

La constitution de ces carte est initialisée par l'état piézométrique de référence 2007 en régime permanent influence par les variations des débits de pompages et la variation de l'infiltration.

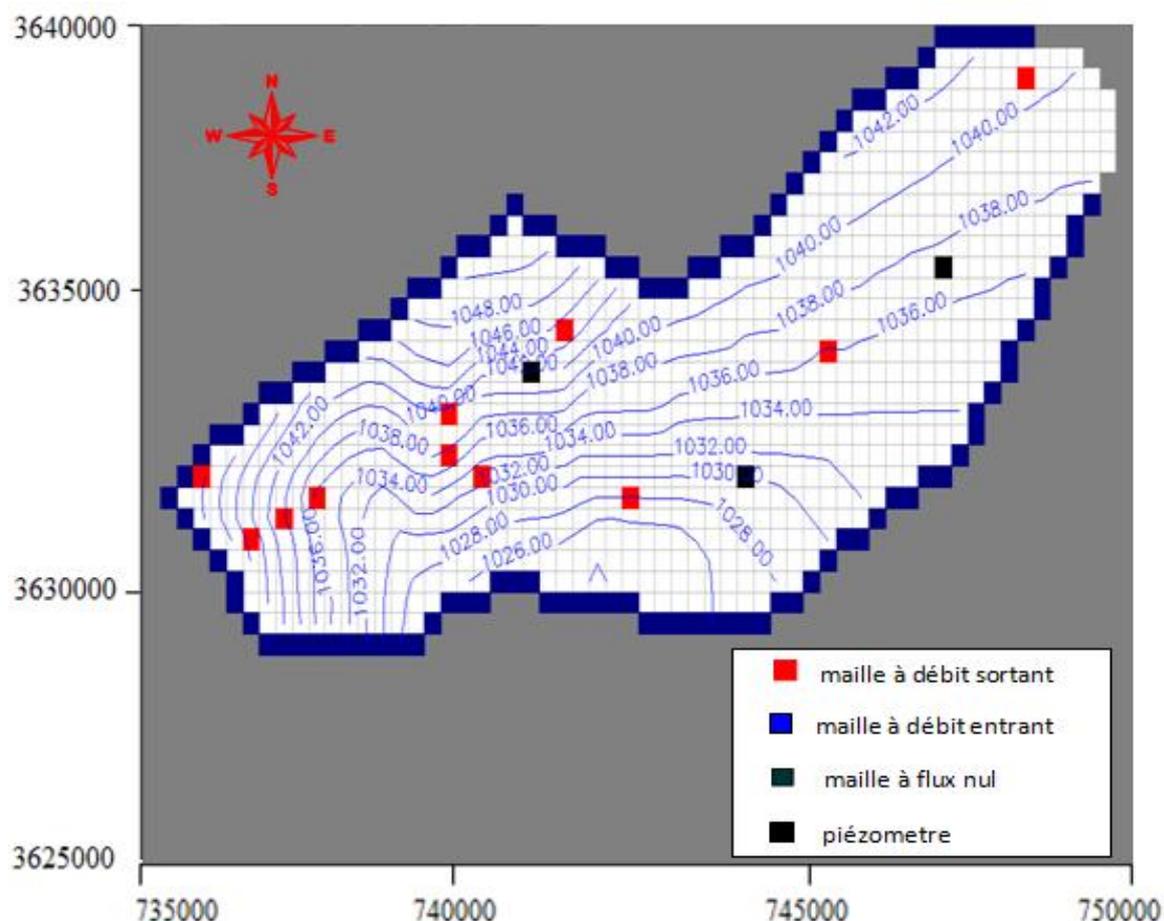


Figure 45 : Le carte simulée 2009 de la nappe Barrémo-Albo-Aptienne

11.2.3 L'allure générale de la carte piézométrique simulée 2010 :

La restitution de la carte piézométrique simulée de 2010 consiste à initialiser le calcul avec l'état piézométrique simulé en régime permanent influencée par les pompages et variations de recharge. Seulement, un jeu de la variation de la transmissivité nous a permis de retrouver une superposition entre les potentiels mesurés et calculés

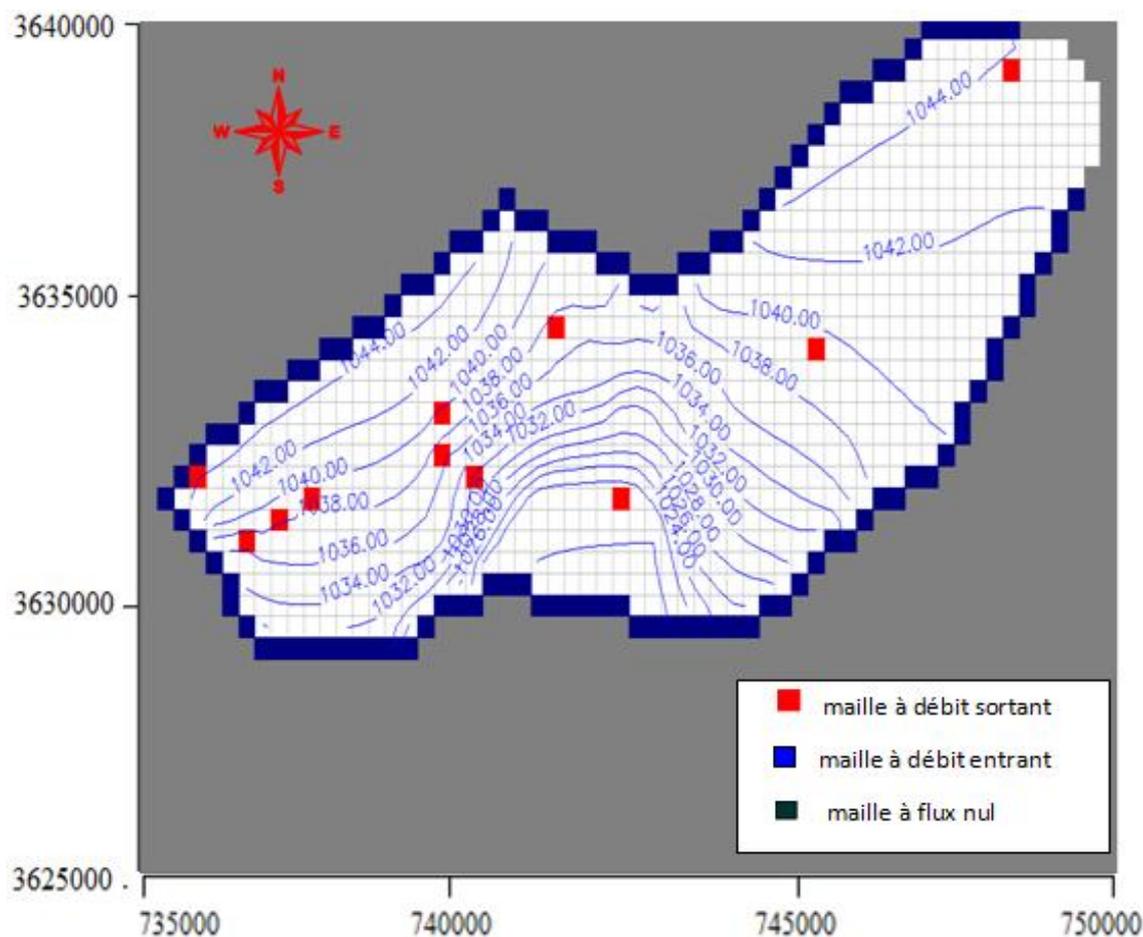


Figure 46 : La carte piézométrique simulée 2010 de la nappe Barrémo-Albo-Aptienne

12. Les scénarios :

Pour tester la réactivité du système aquifère lorsqu'il est soumis à des changements de ses conditions limites (recharge et prélèvement). Par ailleurs, établir des hypothèses sur la recharge et/ou les prélèvements sur une période plus longue serait plus délicat et plus difficile à argumenter.

Les scénarios proposés sont des scénarios qui ont pour vocation de servir d'appui à la gestion de la ressource en eau.

12.1 Prélèvement :

L'hypothèse de base est que l'évolution de la consommation suit l'évolution de la population et les prélèvements d'irrigation, on ajoute des forages pour augmentée la capacité de capacité de pompage, correspondant à une production totale soit le double.

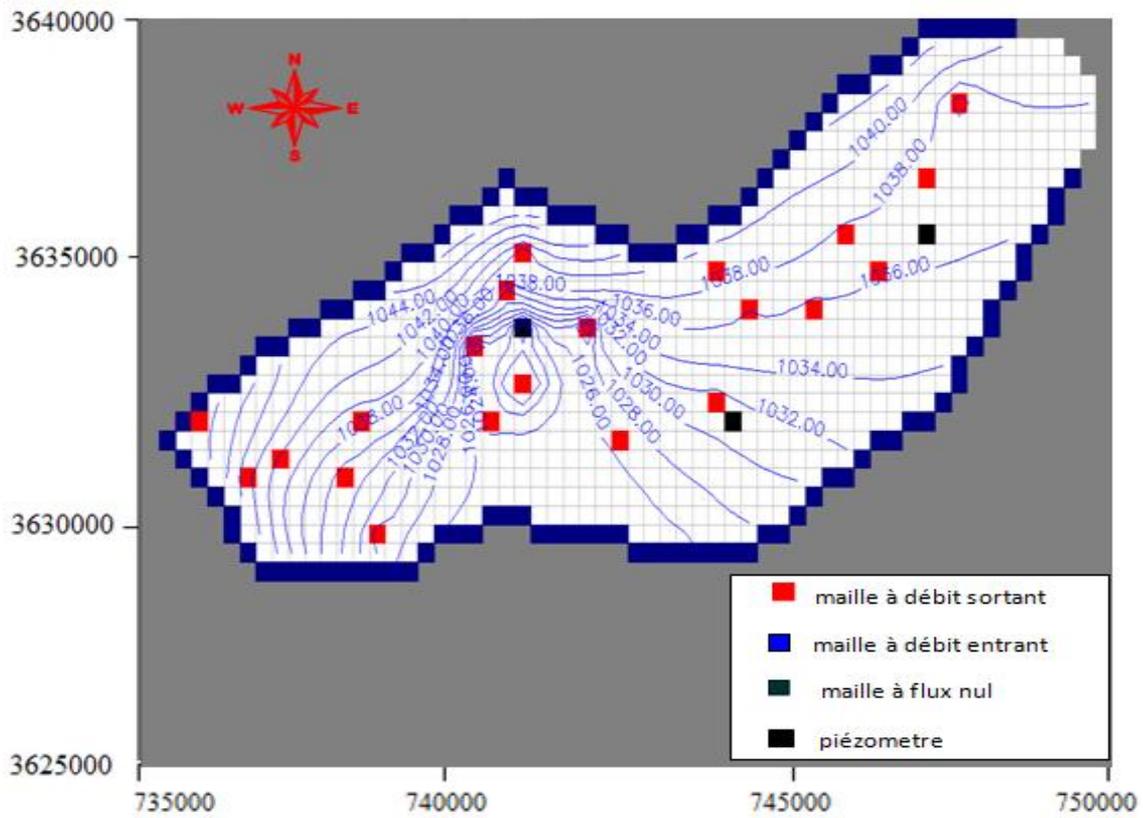


Figure 47: Simulation hydrodynamique (prélèvement)

On constate que malgré une augmentation des prélèvements AEP et localement de l'irrigation, l'impact sur la piézométrie de la nappe reste limité. En effet, globalement la nappe enregistre une baisse de l'ordre de 50 cm suite à ces augmentations de prélèvements.

12.2 Recharge :

Au niveau des scénarios, les apports latéraux Est et sont inchangés par rapport au calage. Par contre, plusieurs hypothèses d'infiltration sont faites pour les recharges directes par infiltration des pluies,

MODELISATION

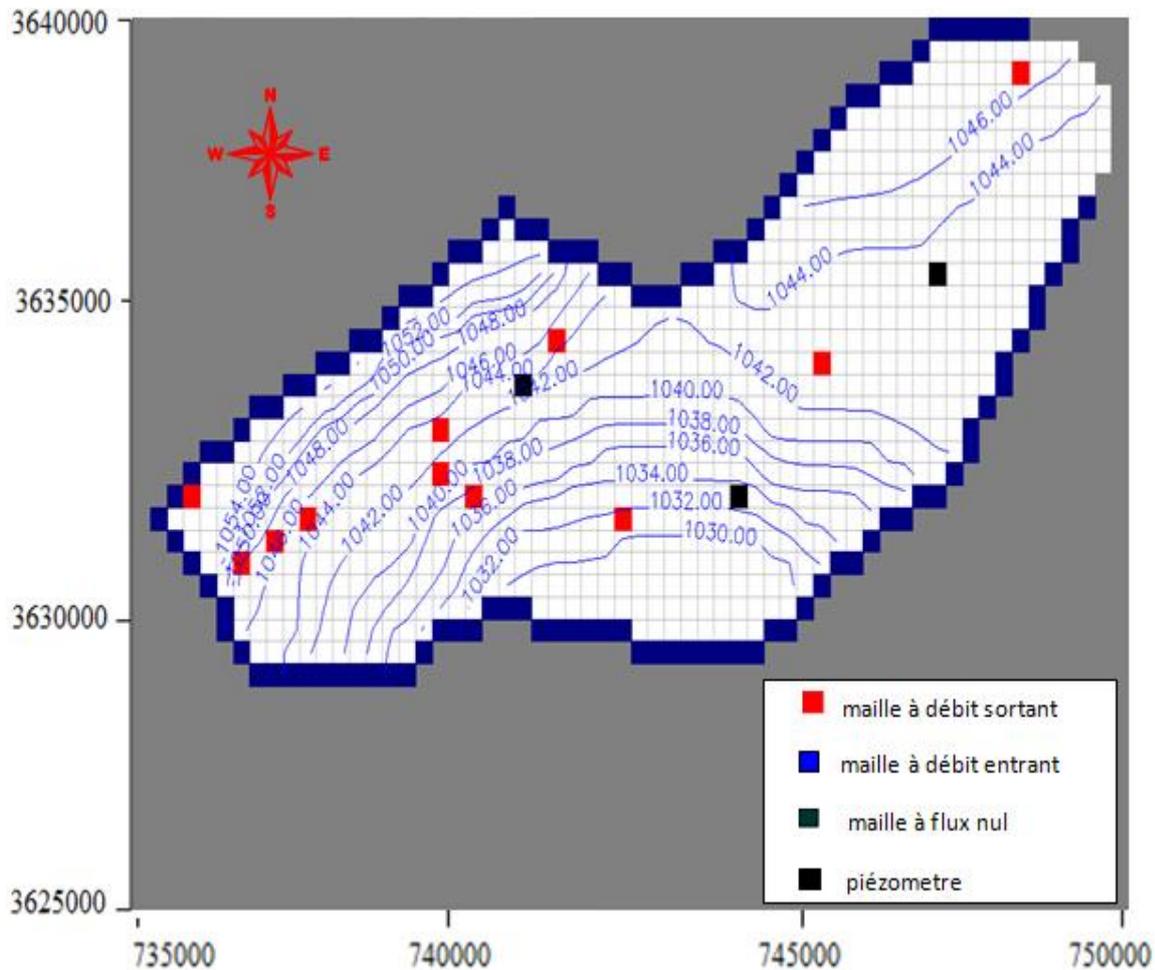


Figure 48 : simulation hydrodynamique (recharge)

La carte piézométrique obtenue (figure 46) montre une augmentation piézométrique considérable de plus de 3 mètres, et un bilan de $1.29 \cdot 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$. Les débits d'échange de la nappe après la simulation de la recharge sont représentés dans le tableau 15.

Tableau 16: bilan de la nappe calculé par le modèle pour le scénario de recharge.

FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
CONSTANT HEAD	1.769499E+00	1.692481E+00	7.701743E-02
WELL	0.000000E+00	2.530000E-01	-2.530000E-01
LEAKAGE	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
BOUNDARY FLOW	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
RECHARGE	6.351499E-01	0.000000E+00	6.351499E-01
SUM	2.654907E+00	2.654894E+00	1.287460E-05

Conclusion :

L'étude de modélisation du système aquifère du synclinale de Maader a consisté à mettre en place un outil numérique à partir des données disponibles permettant une gestion rationnelle de la ressource en eau.

La synthèse des données a été menée de façon à rassembler les différents éléments nécessaires à la définition d'un modèle, à partir des informations disponibles, il a été possible de définir un modèle conceptuel qui représente le plus fidèlement possible le fonctionnement du système aquifère du synclinale de Maader.

A la suite d'une phase de calage, le modèle numérique obtenu est apte à reproduire les principales caractéristiques de l'écoulement souterrain. Il constitue alors un outil pertinent pour la simulation du fonctionnement de la nappe lorsqu'elle est sollicitée selon différents scénarii.

Les scénarii qui ont été simulés ont mis en évidence une baisse du niveau piézométrique de la nappe sur l'ensemble de la zone d'étude, et donc la poursuite de la surexploitation de la nappe du bassin. Les simulations montrent que les taux de prélèvements actuels ne peuvent être maintenus à long terme.

CHAPITRE V

Hydrochimie

HYDROCHIMIE

1. Introduction :

L'hydrochimie met en évidence les relations existantes entre l'eau et les formations géologiques qu'elle traverse. Elle permet aussi de connaître la répartition des faciès chimiques, de comparer entre eux et voir aussi leur aspect qualitatif.

L'étude hydrochimique est basée sur l'interprétation des analyses chimiques des échantillons prélevés par la Direction de l'hydraulique de la wilaya de Naama au niveau de 10 forages.

Les analyses chimiques ont été effectuées au laboratoire de l'ANRH d'Oran elles sont représentées dans le tableau annexe, elles concernent les paramètres suivants : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- .

2. Contrôle des analyses par balance ionique :

Les analyses peuvent être contrôlées par la formule suivante :

$$BI = \left| \frac{\sum r^+ + \sum r^-}{\sum r^+ - \sum r^-} \right| \times 100$$

Avec : BI : Balance ionique en (%)

r : quantités en réaction en mg/l.

Expression des résultats : Si $BI > 5\%$ => erreur dans l'analyse.

Si $2 > BI > 5\%$ => l'analyse est acceptable.

Si $BI < 2$ => bonne analyse.

Tableau 17: valeurs de la balance ionique et Les paramètres physiques.

POINT EAU	X	Y	BI	R S	PH	Dureté	Minéralisation
Maader2	738947,00	3630908,00	1,96	720	7,8	47	648
Maader3	738930,80	3629298,60	2,64	1080	8,4	48	1008
Maader4	742359,80	3632662,20	2,43	660	7,29	35	567,4
Matlag	743294,00	3628650,00	2,8	3460	8	139	3456
Source Tiout	741831,60	3629403,00	2,59	680	8	47	720
PuitsMehissrat	733198,00	3627833,80	2,36	680	8,4	39	576
Slih	734758,00	3628666,00	2,34	1000	8,4	52	792
Tiout 2	745050,7	3628679	3,01	2200	8	83	1944
Source chaib	742213,25	3629142,03	2,42	1663	6,5	85	1728
Tiout Gare	737600	3627250	2,39	1900	8,2	88	1440

HYDROCHIMIE

Les valeurs de la balance ionique sont comprises entre 2% et 5% pour tous les points d'eau sauf Maader2 qui inférieure à 2%, donc elles sont acceptables.

2.1 Les paramètres physiques :

2.1.1 Le potentiel d'hydrogène :

Le pH d'une solution varie en fonction de la concentration en ions (H_3O^+) ou H^+ . Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14, le 7 étant le pH de neutralité. Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique et dépend de facteurs multiples, dont l'origine de l'eau.

Les valeurs du pH des eaux dans notre zone d'étude sont comprises entre 6,5 et 8,4 elles sont donc dans les normes algériennes de potabilité (tableau 01).

2.1.2 La minéralisation :

C'est la quantité des sels minéraux dissous contenus dans l'eau, elle est estimée à partir de la mesure de la conductivité. Dans la région de Maader, on a une minéralisation très élevée, qui augmente au Sud de ce synclinal aux puits (Maltag, Tiout Gare, Tiout2 dépassent la concentration maximale admissible selon les normes Algériennes 1000 mg/l), cela est due au lessivage des pointements triasiques localisés au Sud de Tiout. Les puits (Slih, Mehissrat, Maader2, Maader3, Maader4) qui situés au Nord de Tiout avec des valeurs comprises entre 567 et 1000 mg/l).

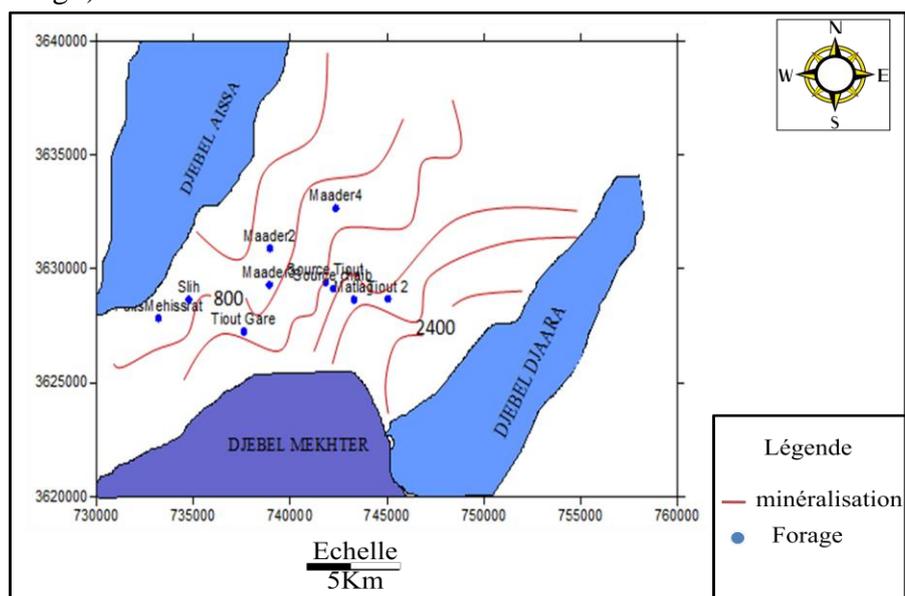


Figure 49 : Carte de minéralisation

HYDROCHIMIE

2.1.3 La dureté totale :

La dureté hydrotimétrique totale de l'eau correspond à la somme des concentrations des ions Calcium (Ca^{2+}) et de celle des ions magnésium (Mg^{2+}), elle est donnée en degré français.

$$\text{TH} = r (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) \text{ meq/l}$$

La dureté s'exprime aussi en équivalent de carbonate de calcium ou calcaire (CaCO_3).

Tableau 18: classification des eaux en fonction de la dureté.

Dureté en °F	Dureté en mg/L de CaCO_3	Qualification de l'eau
0 – 3	0 – 30	Très douce
3 – 6	31 – 60	Douce
6 – 12	61 – 120	Moyennement douce
12 – 18	121 – 180	Dure
≥ 18	≥ 180	Très dure

Dans la région de Maader, la dureté des eaux varie entre (35 et 135mg /l), caractérisant une eau douce a moyennement douce de Tiout vers le Nord, Au Sud l'eau devient dure.

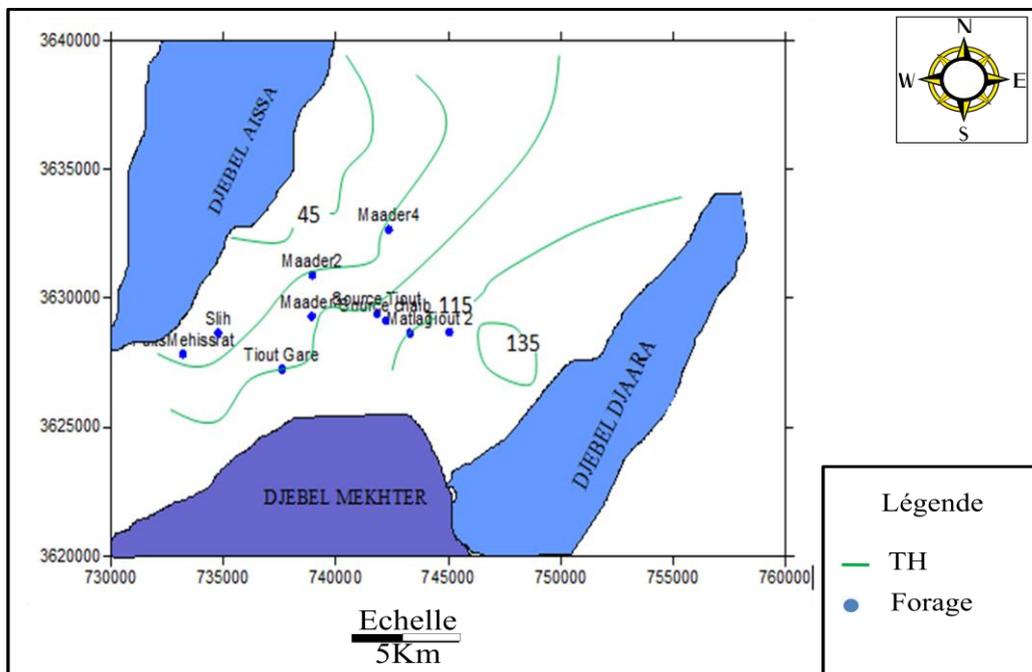


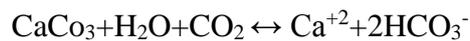
Figure 50 : Carte de dureté

3. Interprétation des cartes d'iso- teneurs :

L'étude des cartes d'iso-teneurs permet de donner les indications sur l'origine des ions contenus dans les eaux souterraines.

3.1 Carte d'iso-teneur Ca^{++} :

Le calcium provient de la dissolution des roches carbonatées due à la présence de gaz carbonique dans l'eau qui s'est infiltré à travers ces formations.



La carte d'iso-teneur Ca^{++} montre un accroissement progressivement du N.E vers le S.W, avec des valeurs comprises entre 80 et 360mg/l.

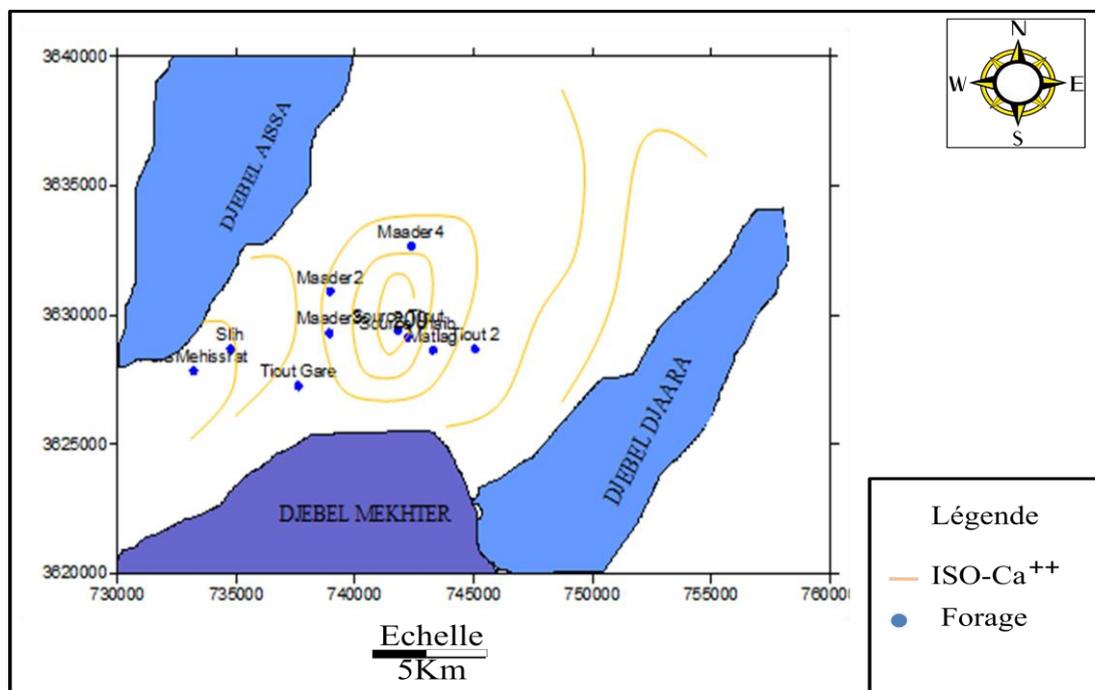


Figure 51: Carte isoteneur Ca^{++}

3.2 La carte d'iso-teneurs en Mg^{++} :

Le magnésium peut être apporté par la dissolution des dolomies $\text{Ca Mg} (\text{CO}_3)_2$, soit par la dissolution des dolomies dans le terrain anhydritique (MgSO_4), ou par les formations dolomitiques libérant le magnésium par l'attaque des eaux en présence de gaz carbonique.

La teneur de magnésium des eaux étudiées est comprise entre 30 et 90mg/l. Donc la teneur respecte les normes algériennes.

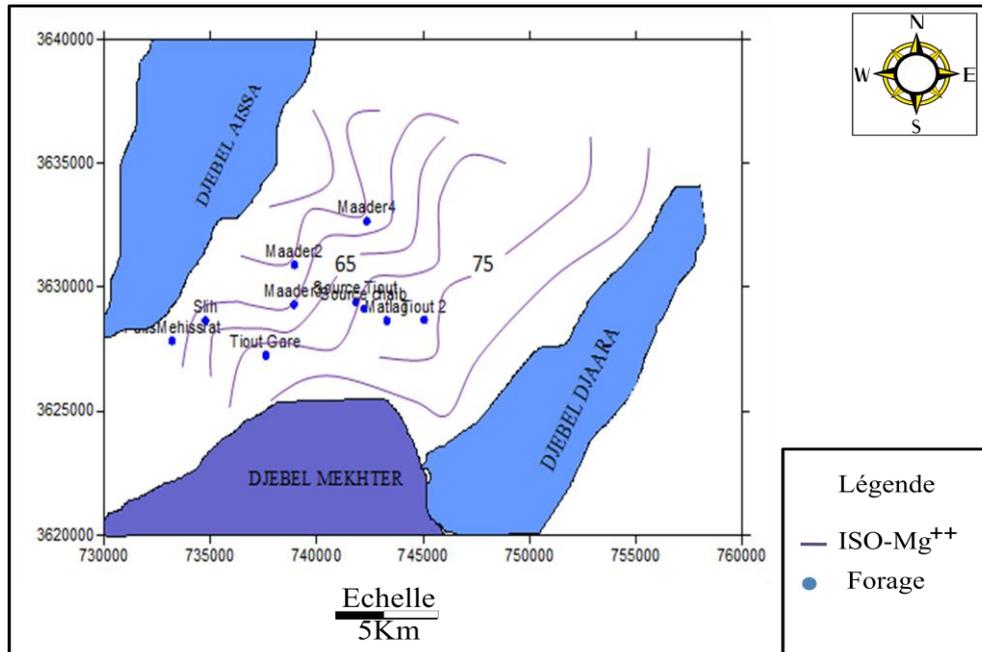


Figure 52 : Carte isoteneur Mg⁺⁺

3.3 La carte d'iso-teneurs en Na⁺ :

Le Sodium est toujours présent dans l'eau provenant du lessivage des formations géologiques riches en NaCl et de la dissolution des formations argileuses et marneuses. Le Potassium est beaucoup plus moins abondant que le sodium. Les normes algériennes recommandent une valeur limite de 200mg/L de Na⁺, la concentration trouvée pour les eaux étudiées est comprise entre 20 et 560 mg/L, les valeurs les plus élevées sont localisées au Sud de la ville de Tiout vers Djebel Djaara.

HYDROCHIMIE

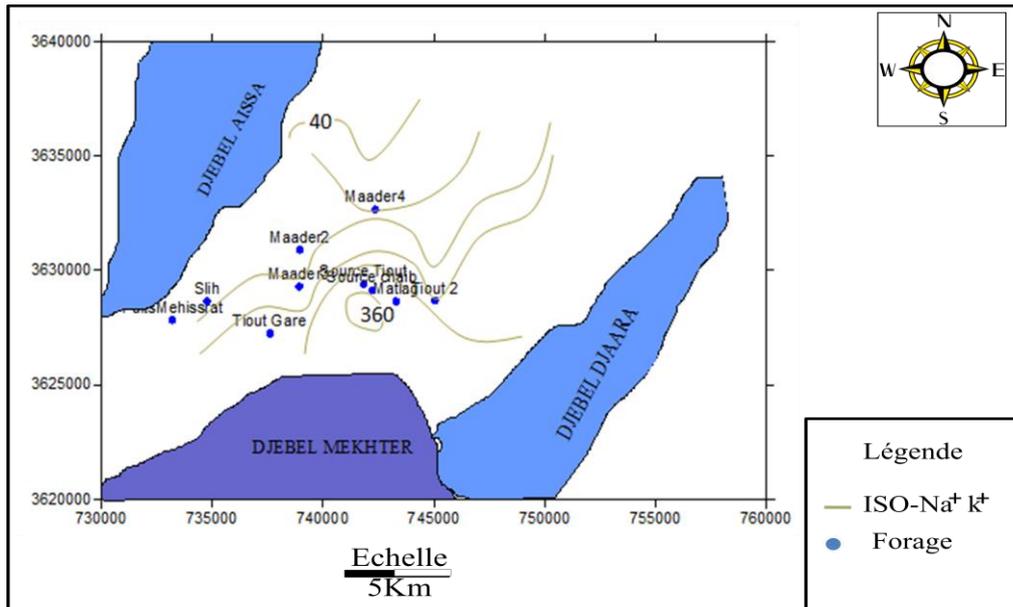


Figure 53 : carte isoteneur Na⁺ K⁺

3.4 Carte d'isoteneur en Cl⁻ :

Les chlorures rencontrés en grande quantité dans les eaux souterraines, proviennent de la dissolution et lessivage des terrains salifères, La teneur des chlorures des eaux étudiées est comprise entre 50 et 900mg/L, les valeurs qui dépassent la concentration maximale admissible 500mg/L, en se dirigeant Sud vers Djebel Djaara.

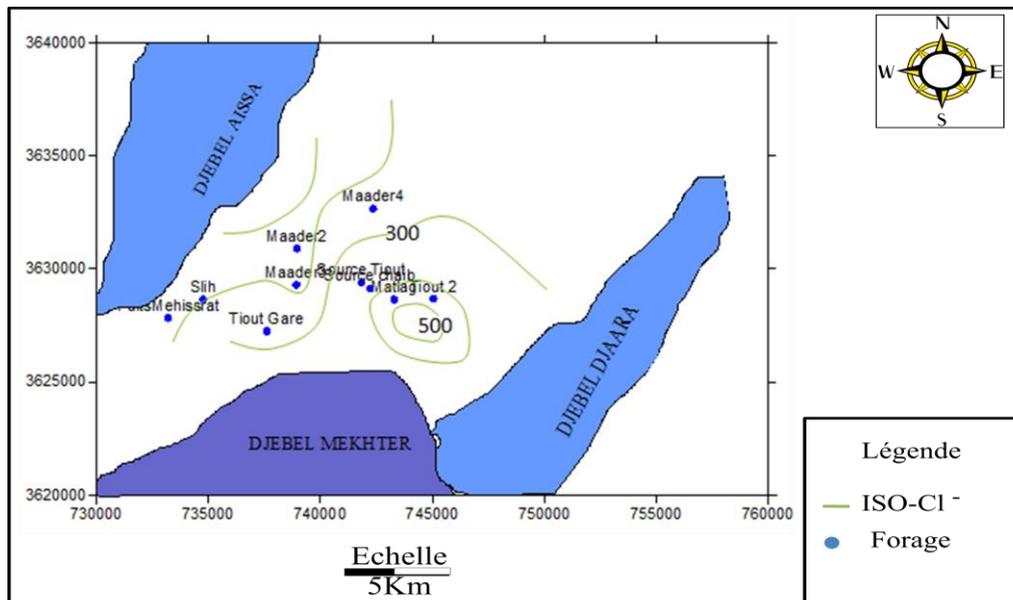


Figure 54 : carte isoteneur Cl⁻

3.5 Cartes d'iso-teneurs en SO_4^-

Les sulfates sont toujours présents dans les eaux naturelles, leur présence provient soit d'une légère solubilité des sulfates de Calcium (CaSO_4) des formations gypseuses, soit du lessivage des terrains argileux et marneux

Les teneurs en SO_4^- sont comprises entre 100 et 1050 mg/l. Elles sont dues à l'extension des formations argileuses du Crétacé.

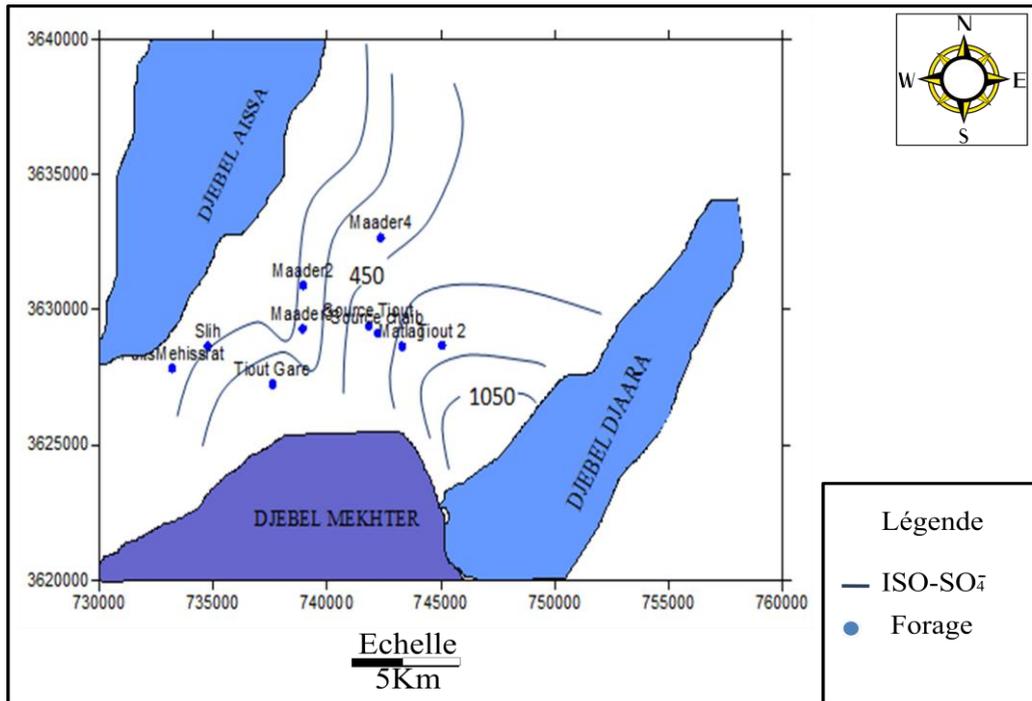
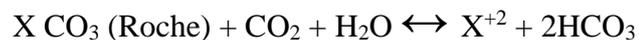


Figure 55 : carte isoteneur SO_4^{2-}

3.6 Carte d'iso-teneurs en Bicarbonates (HCO_3^-) :

Ce sont les résultats de l'équilibre physico-chimique entre les roches, l'eau et le gaz carbonique selon l'équation :



Ils proviennent de la dissolution des roches carbonatées dans l'eau, en fonction de la teneur en CO_2 de la température, du pH et de la nature lithologique des terrains traversés.

Les teneurs en HCO_3^- sont comprises entre 175 et 278 mg/l Avec l'augmentation de concentration vers le Sud

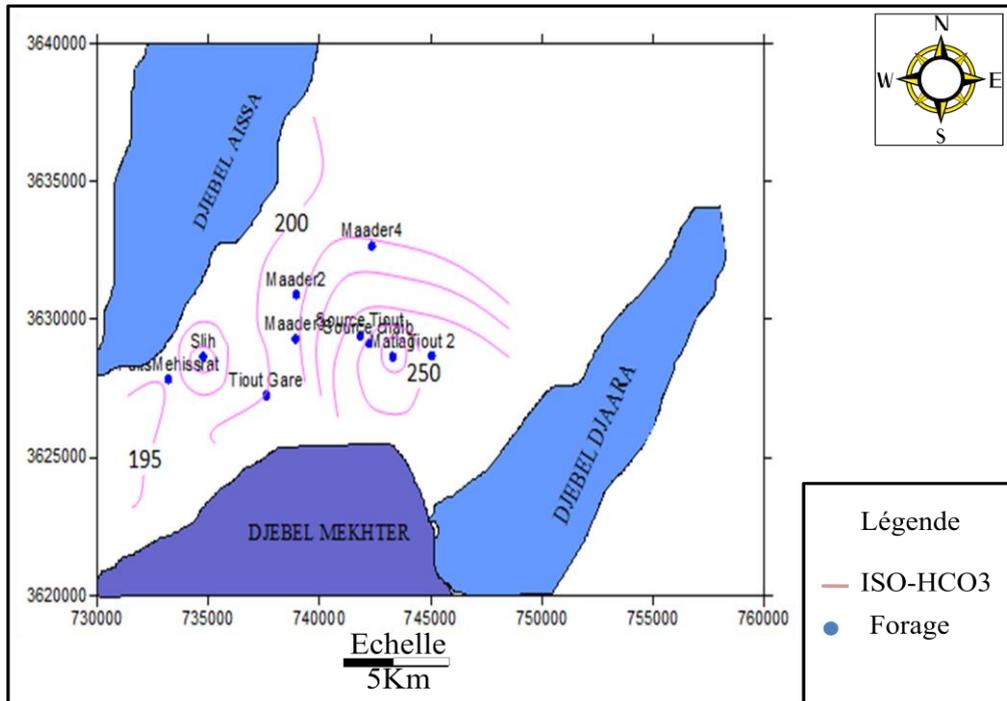


Figure 56 : carte isoteneur Hco-3

4. Qualité des eaux pour l'irrigation selon le SAR:

(S. A. R. Sodium Alcalinité Ratio).

Vu le futur développement de l'agriculture dans notre région d'étude, nous avons jugé utile de déterminer l'aptitude des eaux souterraines à l'agriculture.

Pour cela nous avons déterminé le **S. A. R.**

En irrigation on utilise le S.A.R de l'eau comme mesure de l'échangeable Sodium Ratio (ESR) pour estimer la convenance d'une eau à l'irrigation :

$$SAR = \frac{rNa^+}{\sqrt{rCa^{2+} + rMg^{2+} / 2}}$$

Avec: Na^+ , Ca^{2+} , et Mg^{2+} en meq/L

Le tableau N° donne la valeur du SAR et de la conductivité.

Tableau 19: valeurs du SAR pour les eaux étudiées

POINT EAU	SAR	CONDUCTIVITE
Maader2	1,49	758,16
Maader3	2,19	1179,36
Maader4	1,23	663,858
Matlag	6,5	4043,52
Source Tiout	1,57	842,4
PuitsMehissrat	1,71	673,92
Slih	2,47	926,64
Tiout 2	5,88	2274,48
Source chaib	2,9	2021,76
Tiout Gare	2,69	1684,8

SAR<10 eau excellente

10<SAR<18 bonne eau

18<SAR<26 eau convenable

SAR>26 eau médiocre

D'après le tableau ci dessus, on constate que les points d'eau sont excellentes pour l'irrigation (SAR<10).

5. Représentations graphiques de la qualité des eaux :

Les eaux prennent au cours de leur trajet des faciès différentes dont on peut suivre l'évolution en classant les eaux en fonction des teneurs des anions et des cations et en utilisant des diagrammes.

5.1 Diagramme de Piper:

La représentation des analyses chimiques dans le diagramme de Piper permet d'avoir une approche de la composition chimique d'une eau. Ce diagramme est établi à partir des quantités en réaction en pourcentage.

HYDROCHIMIE

Les résultats ont été reportés dans le diagramme de Piper. La position des points représentatifs des anions et des cations caractérise la composition chimique de l'eau, fait ressortir un groupe très dominant dans tous les points d'eau : chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne.

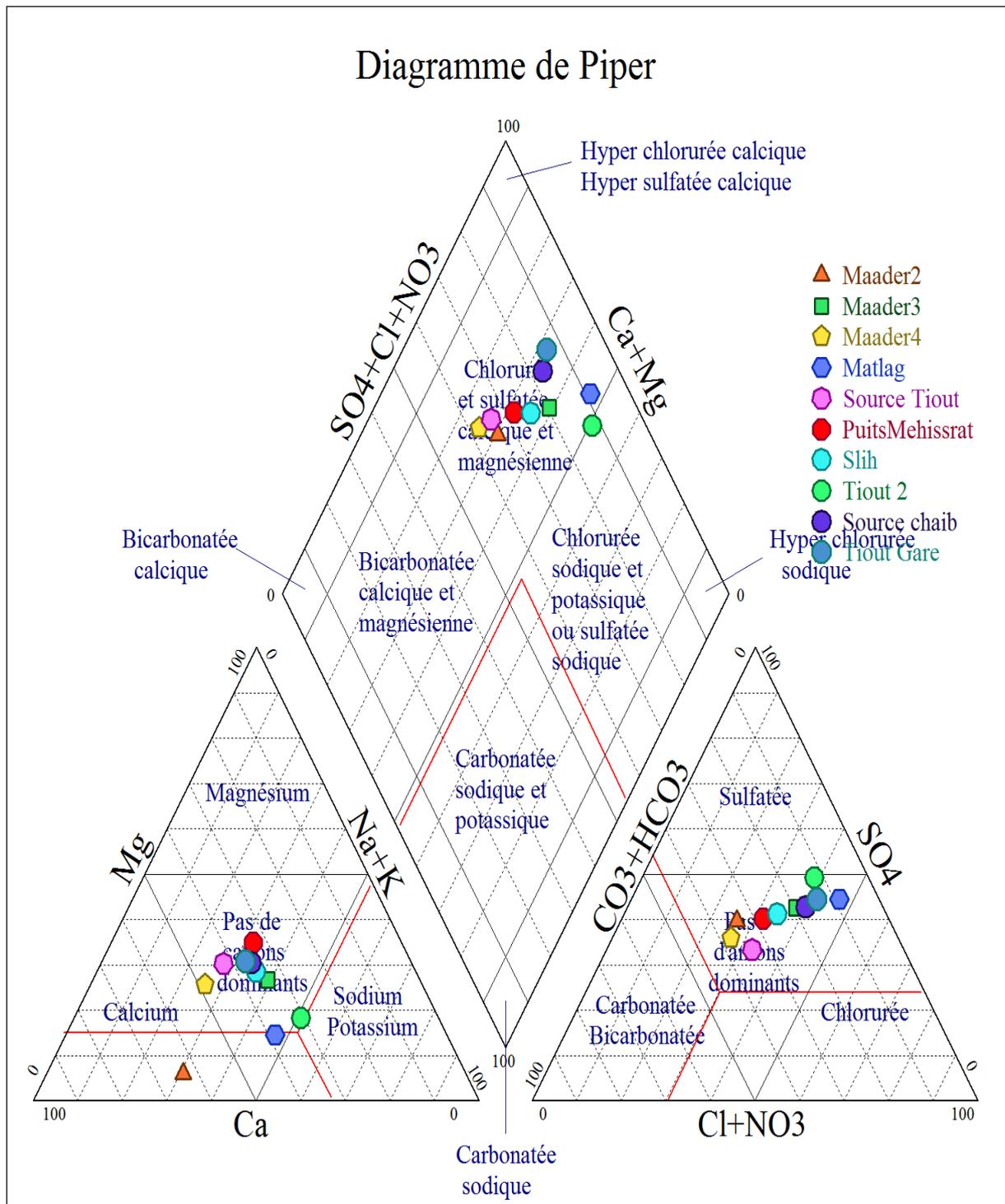


Figure 57: Diagramme de Piper

5.2 Diagramme de Schoeller Berkaloff:

Ce diagramme est utilisé pour déterminer les faciès des eaux et leur évolution. Les analyses chimiques effectuées sur les eaux étudiées permettent de distinguer 5 types de faciès :

- 1- Sulfaté calcique (Maader2, Tiout Gare, Source Chaib, Slih)
- 2- Bicarbonaté calcique (Maader4, Source Tiout)
- 3- Sulfaté magnésien (Puits Mehisserat)
- 4- Chloruré sodique (Malag)
- 5- Sulfaté sodique (Tiout2, Maader3)

HYDROCHIMIE

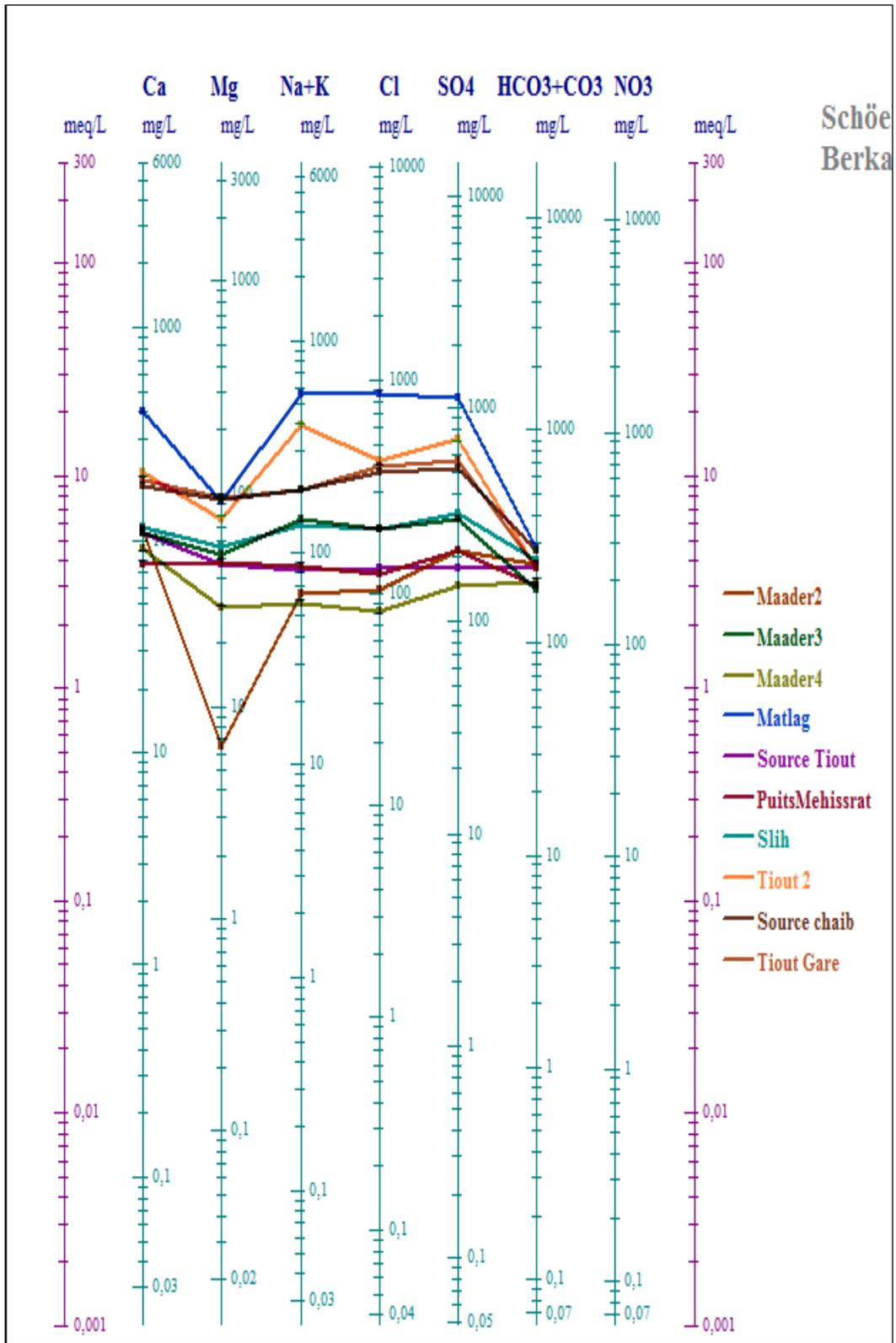


Figure 58 : diagramme de Shoeller Berkallof.

HYDROCHIMIE

5.3 Diagramme de Stiff :

On reporte sur ce diagramme les quantités en réaction (r%). D'un coté Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ et l'autre coté Cl^- , SO_4^{2-} et HCO_3^- .

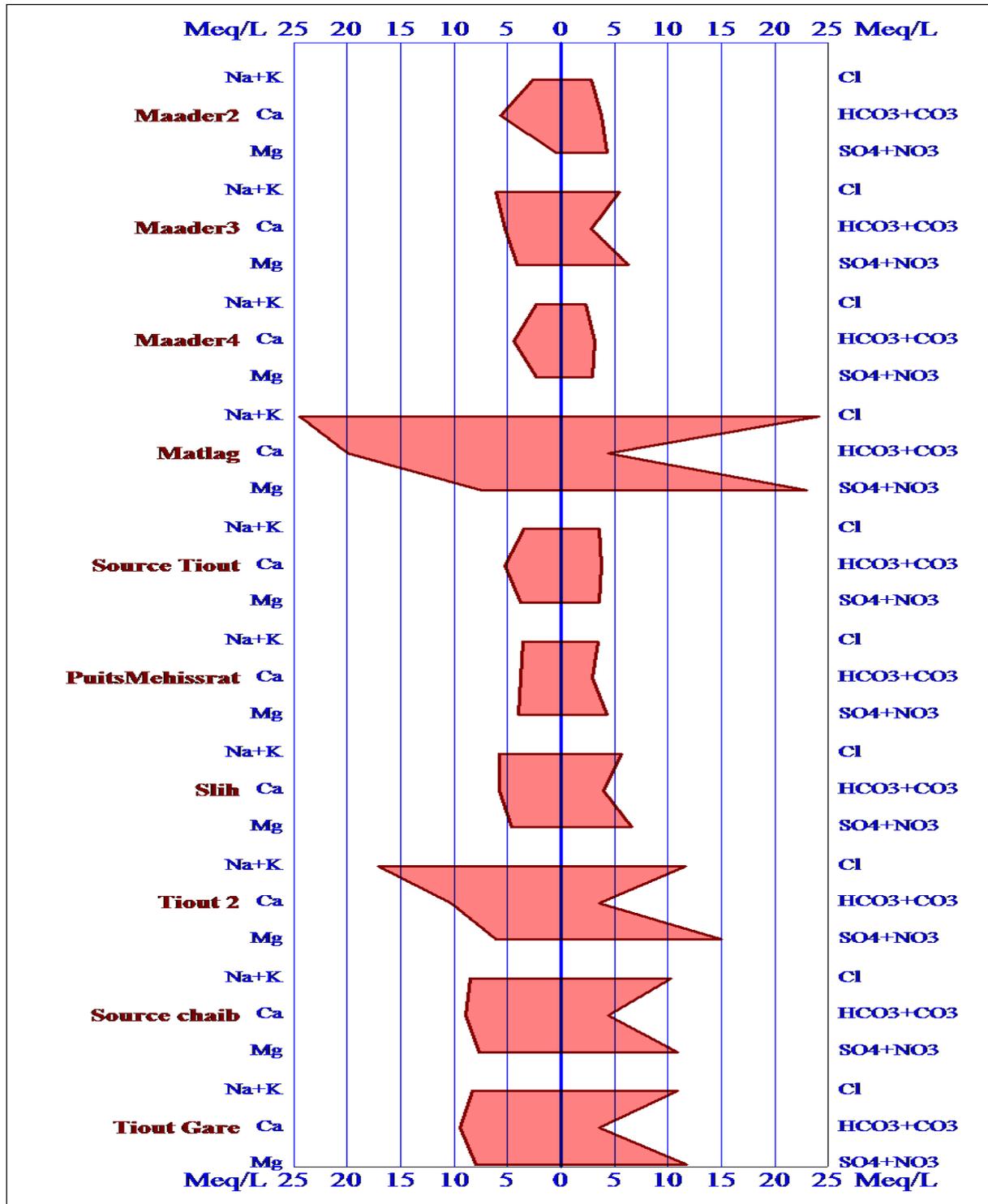


Figure 59 : Diagramme de Stiff

HYDROCHIMIE

Les résultats obtenus par le diagramme de Stiff permettent de classer l'eau analysée

Tableau 20 : les faciès chimiques

Maader2	Sulfaté Calcique
Maader3	Sulfaté Sodique
Maader4	Bicarbonaté Calcique
Matlag	Chloruré Sodique
Source Tiout	Bicarbonaté Calcique
PuitsMehissrat	Sulfaté Magnésien
Slih	Sulfaté Calcique
Tiout 2	Sulfaté Sodique
Source chaib	Sulfaté Calcique
Tiout Gare	Sulfaté Calcique

Conclusion :

L'étude des faciès hydrochimiques des eaux souterraines de la région, montre que celles-ci sont de manière générale, de nature Sulfaté Calcique à Magnésienne et Chlorurée Sodique à Calcique.

Le Faciès Sulfaté calcique : qui englobe la majorité des points d'eau, ce faciès est le résultat de la dissolution des interlits gypseux localisés au Sud de Tiout.

En conclusion on peut dire que l'eau de la zone d'El Maader favorable à la consommation d'eau potable.

Conclusion générale

BIBLIOGRAPHIE

Conclusion générale

Ces dernières décennies, l'Algérie a souffert d'un manque d'eau sans précédent. Les sécheresses répétées à travers l'ensemble du pays et la croissance de la population dans les grands centres urbains. A cette effet, il est indispensable d'adopté une politique de gestion et protection de ces ressources, pour objet la mise en disponibilité d'une eau propre et potable pour le citoyen.

Par sa constitution géologique, le bassin versant du Maader est très riche en potentialités en eau. En effet les formations barrémo-albo-aptien du synclinal de Maader qui constituent les principaux réservoirs d'eau souterraines et par conséquent rende une modélisation des écoulements est indispensable.

L'étude hydrogéologique nous a permis d'identifier les principaux aquifères et de préciser la géométrie du réservoir barrémo-albo-aptien du synclinal de Maader.

L'analyse des paramètres géométriques et hydrodynamiques de l'aquifère nous ont permis de réaliser une bonne répartition spatiale des paramètres (piézométrie, transmissivité, coefficient d'emménagement, mur toit et épaisseur de l'aquifère). Les résultats forment la base des données pour le modèle mathématique, dont la simulation en régime permanent s'appuie sur les données du 2007.

Ainsi que la piézométrie simulée, en comparaison avec la carte piézométrique établie à partir des données d'observation. Le calage vise à reproduire l'allure globale des courbes, les directions d'écoulement et les gradients hydrauliques.

Une modélisation mathématique du système aquifère a été réalisée en régime permanent et transitoire.

Cette modélisation mathématique a apporté une contribution à la connaissance du fonctionnement de la nappe barrémo-albo-aptien du synclinal de Maader, et constitue un outil de gestion et de prévision pour les futures exploitations.

Par conséquent, Ce model a pour objet de gérer les sources en eau de la nappe, ainsi que d'étudier l'impact de l'évolution de la surface piézométrique en fonction des débits exhaures lors à une implantation d'une compagne des forages ainsi l'état de la réserve d'aquifère (excédent ou déficitaire).

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

BASSOULET (1973) : présenta son travail fondamental sur le mésozoïque des monts des Ksour. Il établit une subdivision en quatre principaux ensembles lithostratigraphiques qui sont en liaison avec l'évolution sédimentaire du bassin.

DOUIHASNI M. (1976) : Etude géologique de la région d'Ain Ouarka – Boussemghoun (partie centrale des monts des Ksour). Stratigraphie et analyse structurale. *Thèse de Doctorat* 3ème cycle, Université d'Oran 272 p

DERDOUR (2010) : modélisation hydrodynamique de la nappe des grés crétacé du synclinal de Remtha –Monts des ksour- Algérie.

ERIC JANSSENS-CORON (2007): Automatisation du processus de modélisation 3D en hydrogéologie par système expert et ontologies, Thèse de Doctorat en géomatique, Université LAVAL Québec 43p

FLAMAND.G.BM (1911) : Recherche géologique et géographique sur le haut pays de l'Oranie et sur le Sahara (Algérie et territoires du sud). Thèse Sci. Lyon, n47 et A. Ray Lyon, 1001 p

GAGNON F. (1998) : Solution de problème inverse en hydrogéologie à l'aide de méthodes géostatistiques. Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées. Ecole. Polytec. Montréal. 194p

GALMIER D. (1970): Sur l'existence d'un accident tectonique nord atlasique dans la région de Forthassa. C.R. Acad. Sci. Paris.

GALMIER D. (1951) : photogéologie de la région d'Ain Sefra, Algérie, thèse Doctorat d'état . Fac. Sci. Paris, 320p

GAUTIER Y. (1997): Estimation de paramètres géostatistiques à partir de tests de puits, thèse de Doctorat, Université de Paris 06, Paris, France. 167p

GRATTON Y. (2002) : Le krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale. *Articles*. Institut d'Analyse Géographique.

GRANDAROWSKI G. : (1965) Etude hydrogéologique de la région d'Ain Sefra. Rapport, .S.E.S.N° 498/G.E.

KACEMI A. (2002) : Evolution géodynamique du bassin des Ksour (Atlas Saharien occidental) au cours du Mésozoïque, *Exposé*

KACEMI (2005) : Cartographie et dynamique sédimentaire de la série fin Dogger début Crétacé (Djara - Rhoundjaia) des Monts des Ksour (Atlas saharien, Algérie).

BIBLIOGRAPHIE

KAZI TANI (1986): Evolution géodynamique de la bordure Nord-Africaine: le domaine intraplaque nord-algérien. Approche mégaséquentielle. Thèse Doctorat d'Etat, Pau, 784 p

KINZELBACH W., RAUSCH R. CHIANG W. H. (1995): Aquifer simulation model help. L'aide du logiciel ASMWIN.

KONIKOW L.F. (2000): Utilisation de modèles numériques pour simuler les processus d'écoulement et de transport dans les eaux souterraines. Vol. IV, Environmental isotopes in the hydrogeological cycle. Principes and applications. UNESCO/IAEA.

MANSOUR (2007): hydrogéologie du continental intercalaire et du complexe terminal en domaine aride. Exemple des monts des ksour (Atlas Saharien Occidental).

MEKAHLI L. (1995): Hettangien, Bajocien supérieur des Monts des Ksour. Biostratigraphie, évolution paléogéographique et stratigraphie séquentielle. Thèse Doctorat d'Etat, Univ. Oran, 358p

MEKAHLI L. (1998): Evolution des monts des Ksour (Algérie) de l'Hettangien au Bajocien. Bio stratigraphie, sédimentologie, paléogéographie et stratigraphie séquentielle, Docum. Lab. Géol. Lyon. France. Doctorat d'état n146, 319p

MEKAHLI L., ELMI S., BENHAMOU M. (2004): Biostratigraphy, sedimentology and Tecto-Eustatic events of the lower and the middle Jurassic of the Ksour Mountains (Western Saharian Atlas. Southern Algeria) 32nd international geological congress. Italia 2004. volume 5 p37-54

NASOUMOU Y., BESBES M. (2000): Simulation de la recharge artificielle de la nappe en Oued par un modèle à réservoir, Revue Scientifique de l'eau 13/4 (2000) p379-404

O.N.M. (Office National de Météorologie) Ain Sefra (2006): Atlas climatologique national, recueil de données.

OULD BABA S. (2005): Recharge et paléo recharge du système aquifère du Sahara septentrionale. Thèse de doctorat en géologie. Univ. El Manar Tunis. 271p

RAHMANI A. (1994): contribution à l'étude hydrogéologique du synclinal Ain Sefra, Monts des ksour (Atlas saharien occidental, Algérie), mémoire d'ingénieur, Université d'Oran

RAHMANI (2010): Apport des SIG dans caractérisation hydrodynamique et hydrochimique de la nappe crétacé inférieure de la région d'Ain Sefra (Atlas Saharien Occidental)

ROCHE P.A. (2005): Hydrologie. Chap. 6 cours DEA Sciences et techniques de l'environnement. Ecole nationale des Ponts et Chaussées.

BIBLIOGRAPHIE

ROSE BEN SIMON. (2006): Simulation numérique 3D du transfert de polluant au sein d'un aquifère bicouche hétérogène, Mémoire de Master des sciences de l'univers, environnement et écologie, Université Pierre et Marie Curie

TURC L. (1953): le bilan de l'eau des sols, relation entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. 3^{ème} journée de l'hydraulique. Alger pp 36-43

YOUSFI S. (2008): hydrodynamique et modélisation de la nappe alluviale de la plaine de Sidi Bel Abbas (Nord Ouest Algérien), mémoire de magister, Univ. Tlemcen 79p

Y. SECRETAN, M. LECLERC, S. DUCHESNE, M. HENICHE (2001): une méthodologie de modélisation numérique de terrain pour la simulation hydrodynamique bidimensionnelle. Revue des Sciences de l'Eau 14/2, p187-212

Annexe

ANNEXES

Tableau A : L'inventaire des puits

N	points d'eau	x	y	z	NS	N piezo	debit L/s
1	Maader1	737577.55	3629575.35	1069	33	1036	18
2	P3	742223	3629312.24	1036	15.96	1020.04	
3	F6 GCA	737055.79	3630404.48	1076	24.5	1051.5	
4	P5	737600.85	3630466.89	1076	20	1056	
5	P9	740492.34	3631660.04	1055	20.41	1034.59	
6	P10	739452.38	3630310.3	1058	21.83	1036.17	
7	P11	739192.08	3630290.61	1056	22	1034	
8	P12	739357.52	3630027.72	1059	22	1037	
9	P13	737138.11	3629902.27	1066	22.42	1043.58	
10	P14	737603.83	3630276.45	1066	23	1043	
11	Source chaib	741944	3629795	1024	0	1024	
12	Slih	734758	3628666	1055	26.4	1028.6	80
13	Mehisserat (Puits)	733198	3627892.5	1050	19.5	1030.5	13
14	Matlag	742803	3629186	1033	36	997	
15	Maader 2	738947	3630908	1051	22.47	1028.53	18
16	Maader 3	738066	3629548	1056	23.4	1032.6	15
17	Tiout 2	744298	3628816	1033	30	1003	2
18	Source Tiout	741870	3630123	1021	0	1021	
19	Maader 4	742737	3632636	1050	20.9	1029.1	40
20	Puits Tiout	740191	3632391	1058	21.45	1036.55	1
21	Puits Khatir	738993.44	3627989.29	1047	17.4	1029.6	13
22	Puits Mehissrat2	731377	3629287	1076	12.5	1063.5	
23	Mehisserat 2	732800	3627800	1048	23	1025	13
24	Slih 2	734200	3628200	1052	27	1025	13
25	puits Tiouti	738765	3628270	1047	17.75	1029.25	
26	puits Maader 1	737829	3630931	1066	20.35	1045.65	
27	Puits Maader 2	738146	3631816	1072	19.7	1052.3	
28	Hassi Nouss	756805	3638222	1100	40	1060	
29	maader garet smail	739927	3634177	1060	16.1	1043.9	
30	matlag 1	750770	3631960	1100	50	1050	19

ANNEXES

Station : 60560

Indicatif : 60560

Latitude : 32.76 N

Longitude : 00.60 W

Altitude : 1058

Période : 1985-2010

Tableau B : Valeurs des précipitations moyennes mensuelles et annuelles

année	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AUT	P(mm)
1985/1986	25	28.1	4.9	34.5	6.4	7.4	17.2	0.1	10.3	7.8	0.9	4.7	147.3
1986/1987	44.5	56	40	3.5	1.8	6.1	19.8	1.4	4.6	6	1.9	9.2	194.8
1987/1988	1.7	5.5	27.6	12.4	10.3	31.1	16.4	0.9	14	19.3	8.3	0.1	147.6
1988/1989	13.2	7.1	14.1	0.6	31.4	5.5	24.1	20.8	24.7	14.6	2.3	22.7	181.1
1989/1990	8.7	20.1	13.5	8.4	22.7	0	4.1	68.2	165	4.2	12.2	2.9	330
1990/1991	12.5	1.1	3	13.4	2.5	52.3	164	53.2	25.6	38.9	6.5	6.9	379.9
1991/1992	8.8	55.2	0.6	16	3.7	4.2	13.1	4.2	32.5	0.5	8.8	4	151.6
1992/1993	0.6	0	16	1.7	7	31.9	46.5	7.5	4.8	5.1	1	0.4	122.5
1993/1994	10.8	14.6	7.6	4.2	49.5	3.6	6.5	0	1.5	3.6	1	3.5	106.4
1994/1995	57.8	54.7	12.8	0	1.7	4.5	40.6	34.7	0.5	3.1	0.3	5	215.7
1995/1996	11.3	39.2	0.2	5	21.9	23.5	55.3	7.8	5.2	0	12.2	1.6	183.2
1996/1997	4.3	2.7	0	25.3	34.9	0	4.6	45.7	2.9	0	3.1	34.3	157.8
1997/1998	14.6	6.3	3.3	12.7	6.7	6.5	4	4.4	13.2	14.3	0.8	0.5	87.3
1998/1999	28.5	6.7	0.2	11.6	64.8	12	9.9	9	0	0.4	5.4	9.9	158.4
1999/2000	3.4	6	6.6	6.2	0.1	0	1	2.5	8.3	3.4	0	2.4	39.9
2000/2001	22.9	40.1	0	1.8	2.8	1.1	0	2.1	2.2	0.2	0.3	10.6	84.1
2001/2002	8.8	17.9	14	7.6	0	7.5	3.1	27.5	2.3	4.3	1.5	31.4	125.9
2002/2003	11	14.9	38	7.2	20.7	11.1	25.3	8	15.1	0.8	8.3	3.1	163.5
2003/2004	14.8	47.1	32.5	4.9	0.5	13.6	25.8	18.8	18.8	25.4	1.8	8.9	212.9
2004/2005	44.3	3	22.7	16.9	6.1	2	3.1	0	0.6	4.4	1.3	3	107.4
2005/2006	24.9	37.8	44.1	7.8	29.7	11.8	5.7	10.8	43.2	0.4	1.8	3.1	221.1
2006/2007	24.6	7	20.4	17.2	1.7	5.7	2.8	47.6	3.1	0	3.2	31.8	165.1
2007/2008	6.1	171.2	5.84	10.41	9.14	22.63	3.3	1.02	37.09	6.6	12.45	16.27	302.05
2008/2009	34.03	249.43	15.24	10.17	33.79	17.04	55.13	16.51	4.06	6.35	3.82	3.05	448.62
2009/2010	84.33	0	0	0.51	12.19	31.75	15.24	0.25	7.87	12.95	8.12	43.69	216.9

ANNEXES

Station : 60560

Indicatif : 60560

Latitude : 32.76 N

Longitude : 00.60 W

Altitude : 1058

Période : 1985-2010

Tableau C : Valeurs des températures moyennes mensuelles et annuelles

année/mois	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AUT
1985/1986	24	17.7	13.5	7.3	7.2	10.3	10.9	13.9	24	25	29.3	29.44
1986/1987	24	16.7	10	6.8	7.6	9.4	13.6	19.6	21	27	28.6	29.7
1987/1988	26	19.3	11.4	10	8.5	9.4	12.6	17.2	21	25	20.4	30.29
1988/1989	24	18.3	12.7	5.8	4.9	8.7	12.8	14.8	21	25	29.5	28.3
1989/1990	25	18.8	13.7	11	6.2	11.2	14.5	14.6	20	28	29.4	28.5
1990/1991	25	19.3	12.1	6.9	5.8	7.33	11	14.2	18	25	29	29
1991/1992	25	15.5	1.8	7.5	5	8.25	10	15.3	20	22	27.5	27.8
1992/1993	25	17.2	10	8	5.5	7.31	11.3	15.2	20	27	30.6	29.4
1993/1994	23	17.8	11.5	7.5	2	10	12.2	14.2	23	28	31	30
1994/1995	23	17.2	11.8	8	6.5	10.4	11.2	13.1	23	25	29.5	28
1995/1996	22	17.3	13.5	10	9.5	8	12.5	15.8	20	27	28.9	29.5
1996/1997	22	16.2	12.2	8.6	8.7	10.4	12.5	15.5	21	27	30.5	27.7
1997/1998	24	18.4	13.2	9.5	8.6	10.1	13.1	16.9	19	28	31.5	29.5
1998/1999	26	16.8	13.1	1.2	6.5	7.1	12.2	17.8	16	28	31	31
1999/2000	25	20.9	10.4	6.4	4.5	9.8	14.2	16.7	22	26	31.5	29
2000/2001	24	15.3	12.9	9.5	8	9.2	16.1	17.5	20	29	32	30
2001/2002	26	21.5	11 €	2	6.9	9.7	13.7	15.8	21	28	30.5	28
2002/2003	24	18	12.8	10	7.4	8.6	14.6	17	22	29	35.5	28
2003/2004	25	20	11	7.6	7.7	30	13.3	16.1	18	26	30	21.5
2004/2005	16	20.4	10	6.4	3.9	5.7	14.7	18.4	25	28	32	29.5
2005/2006	23.7	19.75	11.7	7.25	4.95	8.3	13.85	18.75	22.55	26.55	29.75	29.45
2006/2007	22.7	19.7	12.95	7.5	8.45	11.5	11.05	15.25	20.4	26.5	30.1	29.15
2007/2008	26.9	19	13.3	8.2	9.2	11.3	14.3	19.2	22.1	28	32.7	31.4
2008/2009	24.1	16.6	10.6	7.3	7.5	10	14.1	15	23.1	28.6	32.8	31.7
2009/2010	21.9	20.7	14.4	12.7	10.8	14.2	16.2	20.7	21.6	27.5	33	31.1

ANNEXES

Tableau D : les épaisseurs des formations

Puits	X UTM	Y UTM	Z	Z Cretacé	Z s	Epai total , Cretacé inf	Z Jurass,	ep, barr,albo- aptien	ep zone saturee
I7	724087.48	3625222.84	1093	562	592	831	262	531	501
J5	719693.39	3624032.10	1105	770	800	485	620	335	305
J6	721123.49	3622606.75	1105	862	892	390	715	243	213
K4	715489.00	3622926.00	1150	1037	1067	248	902	113	83
K5	716807.00	3621530.00	1147	805	835	582	565	342	312
K6	718126.00	3620056.00	1110	934	964	436	674	176	146
F93	727057.84	3626684.87						250	220
Slih	734526.11	3628568.42						850	820
Maader 4	740927.95	3633700.97						900	870
Matlag	744788.42	3628455.05						350	320
cote droit	732809.50	3631221.07						400	370
Puit1	735828.82	3627658.98						400	370
Puit2	726028.99	3627157.81						0	0
Puit3	727158.22	3625451.17						0	0
Puit4	732211.79	3631678.52						0	0
Puit5	735108.02	3625670.03						0	0
Puit6	739972.20	3636204.84						500	470
Puit7	742735.29	3632742.27						550	520
Puit8	739758.13	3636869.62						0	0
Puit9	751414.75	3625865.78						30	0
Puit10	750591.65	3635434.01						550	520
R20	765895.64	3655323.58	1300					0	0
R21	766182.86	3654557.47	1250					0	0
R22	766453.19	3653859.46	1200					0	0
R23	766774.20	3653059.29	1170					20	0
R24	767061.42	3652327.23	1150					113	83
R25	767382.44	3651493.02	1110					192	162
R26	767686.54	3650743.93	1100					200	170
R27	767956.87	3650028.90	1080					226	196
R28	768227.21	3649296.84	1075					123	93
R29	768531.32	3648564.78	1073					333	303
R30	768818.56	3647781.64	1075					560	530
R31	769156.43	3647015.53	1085					650	620
R32	769392.99	3646334.54	1095					380	350
R33	769697.09	3645602.48	1100					58	28
R34	770001.22	3644802.32	1110					0	0
P19	771601.76	3655034.16	1140					150	120
P20	771855.21	3654319.12	1130					250	220
P21	772209.98	3653518.96	1120					162.5	132.5

ANNEXES

Tableau 17: Les paramètres physiques.

POINT EAU	MINER(mg/l)	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	S cations	CL ⁻	So-4	HCo3 ⁻
Maader2	648	112	6.4	60	4	176	102	211	231
Maader3	1008	108	51	138	7	304	197	302	175
Maader4	567.4	91	29	53	4	177	81	148	196
Source Tiout	720	108	47	78	5	238	129	178	230
PuitsMehissrat	576	76	48	78	9	211	123	211	187
Slih	792	116	56	130	4	306	198	322	242
Tiout 2	1944	208	75	390	7	680	416	720	222
Source chaib	1728	182	94	194	3	473	365	503	270
Tiout Gare	1440	192	97	184	12	485	392	566	226

ANNEXES

1- le débit sortant de la nappe de

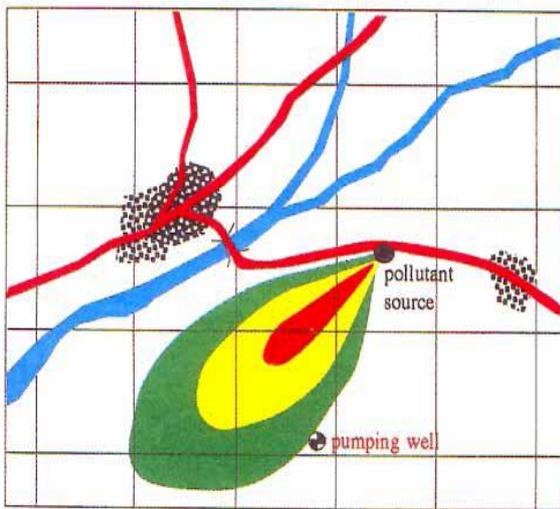
La loi de DARCY par application de la transmissivité : $Q (m^3/s) = T(m^2/s) \cdot L(m) \cdot i$

Avec :

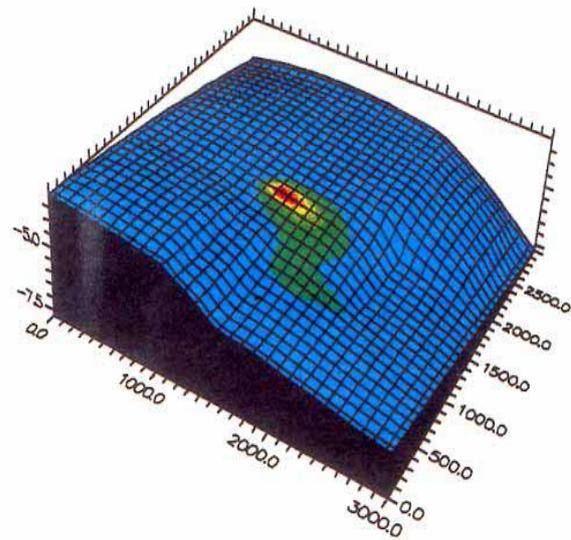
T: Transmissivité du terrain aquifère en m^2/s :

L: Longueur du front d'alimentation (m)

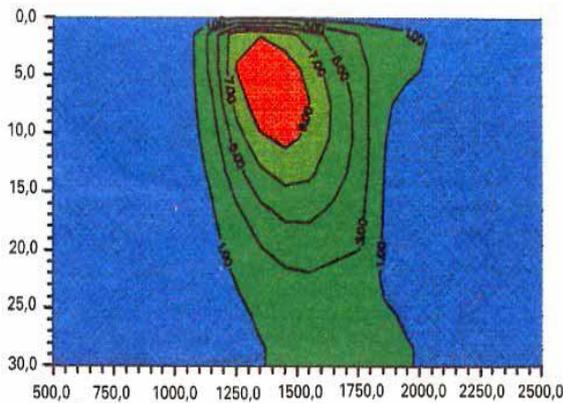
I: gradient hydraulique.

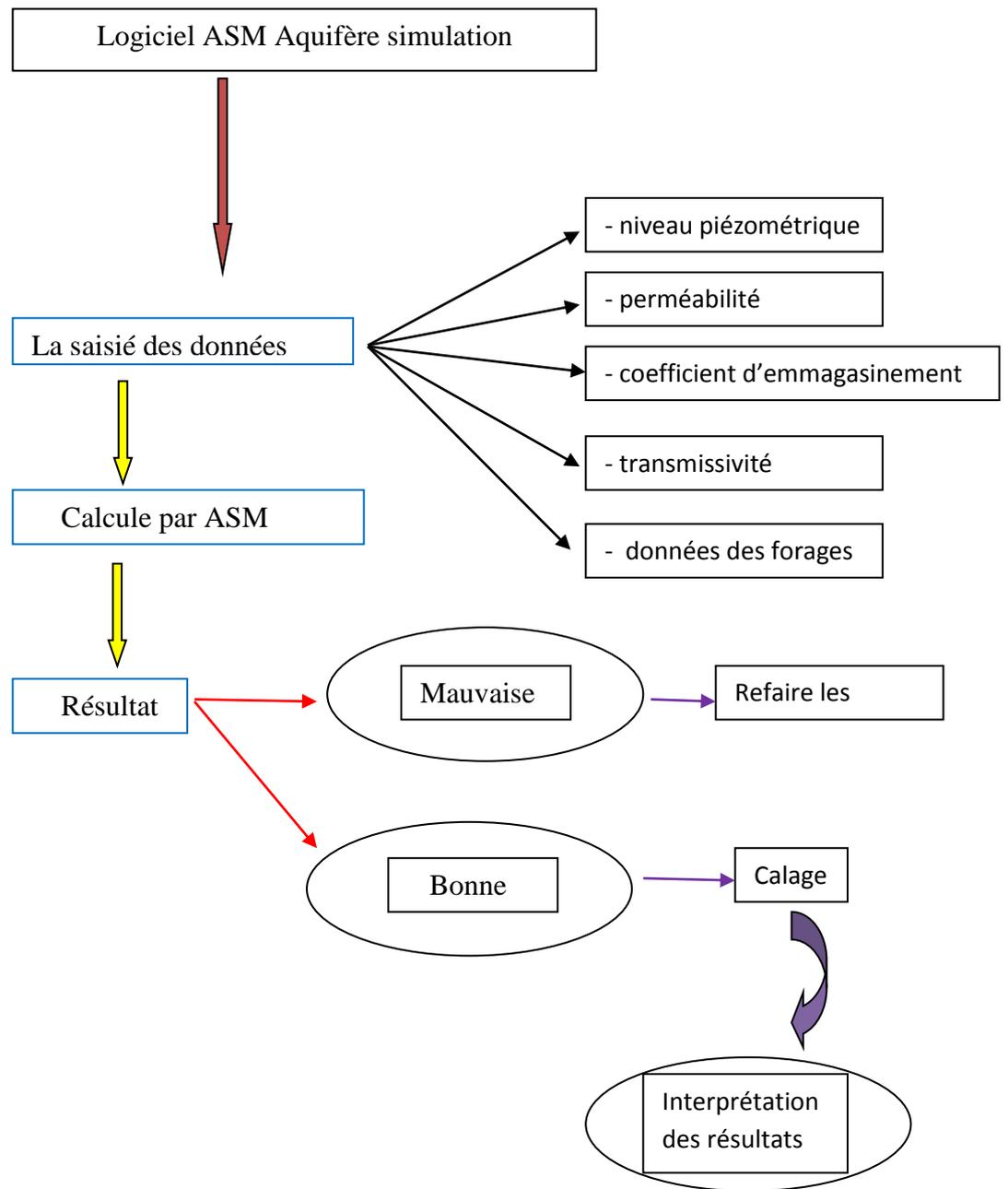


(a) situation



(b) maillage, terrain, concentrations sur la surface





Les étapes de modélisation

ANNEXES



RESUME

La nappe Barrémo-Albo-Aptienne de la gouttière synclinale d'el maader qui fait partie des Monts des Ksour (Atlas Saharien occidental), alimente les habitants ainsi que les périmètres agricoles de cette région (Est Ain Sefra).

La structure géologique de la région d'el maader forme des structures gréseuses importantes très riches en eau lié principalement à la géométrie étendue.

De plus, face aux risques liés aux phénomènes naturels du climat aride et faible impluvium, et aux phénomènes anthropiques : sur exploitation de la nappe de Maader, pour les besoins d'alimentation suite à la croissance démographique et surtout la création de plusieurs périmètres agricoles, une gestion des ressources en eau avec un modèle mathématique devient indispensable.

L'utilisation du modèle mathématique basé sur la méthode des différences finies en régime permanent et transitoire a permis de mieux comprendre les rôles relatifs des facteurs essentiels du système.

Cette modélisation mathématique a apporté une contribution à la connaissance du fonctionnement de la nappe barrémo-albo-aptienne du synclinal d'el maader, et par conséquent leur gestion, en particulier dans le cadre de l'aménagement des eaux souterraines.

Mots clé: Barrémo-Albo-Aptien, synclinal, Maader, modèle mathématique, simulation

ABSTRACT

The Barremo Albo-Aptian water table of El maader is a part of the Ksour Mountains (Western Saharian Atlas), supplies the inhabitants and the agricultural in this area (East of Ain Sefra).

The geological structure of the area El maader form important structure of sandstone is very rich in water, it located in extensive formations.

Moreover, given the risks associated with natural phenomena of the arid climate and low catchment, and anthropogenic phenomena on exploitation of the water table of Maader Syncline for power continued population growth and particularly the creation of several agricultural areas needs management of water resources with a mathematical model is indispensable.

The use of mathematical model based on the end difference method in permanent and transient which facility to understand the roles of relative factors of system.

This mathematical modeling has contributed to the knowledge of operation of the Barremo Albo-Aptian water table and gives a better understanding of the workings, especially the management of groundwater.

Key words: Barrémo-Albo-Aptien, synclinal, Maader, mathématique modèle, simulation
